

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université Djillali Liabès  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil



Thèse de doctorat

# **Etude du comportement de béton renforcé à l'aide des matériaux composites sous l'effet de la température**

Présentée au  
Département de Génie Civil, UDL, Sidi Bel Abbès

Pour obtenir  
Le diplôme de **Docteur en sciences**

Spécialité : **Génie Civil**  
Option : **Matériaux**

Par  
**HADJ MOSTEFA Adda**

Soutenue le 03-12-2015 devant la Commission d'examen

Jury MM.

A. AID	Professeur,	Président
T. BOUZIANI	Maître de conférences rang A,	Examineur
H. TROUZINE	Maître de conférences rang A,	Examineur
Y. GHERNOUTI	Maître de conférences rang A,	Directeur de thèse
Y. SEBAIBI	Professeur,	Co-directeur de thèse
M.S. GHEMBAZA	Professeur,	Invité

## **Résumé**

Ce travail de thèse s'intéresse à l'étude du comportement des colonnes en béton renforcés par des matériaux composites en fibres de verre et fibres de carbone soumises à des températures élevées. En premier lieu une investigation expérimentale à été effectuée sur le comportement des éprouvettes cylindriques sous un chargement axial de compression, le béton est initialement exposé à une température de 600C° jusqu'à la fissuration intense, puis réparé par le collage d'un tissu composite en fibre de carbone et fibre de verre. Les résultats obtenus dans cette partie nous ont permis de conclure que la réparation de béton endommagé sous l'effet de la température à l'aide des PRF peut rattraper la chute de résistance du béton endommagé et par fois même dépasser sa résistance initiale de 9MPa dans le cas des fibres de carbone. Cependant, en raison de la sensibilité relativement élevée de ces matériaux composites à des températures élevées et au feu, ce qui rend le renforcement totalement inutile, une deuxième partie expérimentale à été réalisée pour faire face à ce problème par l'utilisation d'une couche en matériaux cimentaires. Les éprouvette en béton ont été renforcées à l'aide des PRF, protégées par une couche en matériaux cimentaires de mortier ou de plâtre. Les colonnes ont été testées à différentes températures. En comparant les échantillons confinés protégés et non protégés, la protection par une couche de plâtre ou de mortier de ciment est clairement justifiée, lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées de l'ordre de 350°C. Enfin, on peut dire que, ce système de revêtement permettrait d'améliorer la résistance au feu, la sécurité et la fiabilité des structures en béton renforcés à l'aide des PRF.

**Mots clés:** Béton, renforcement, PRF, matériaux composite, température, plâtre, mortier.

## **Abstract**

This thesis focuses on the study of the behavior of concrete columns reinforced with composite materials carbon and glass fibers, subjected to high temperatures. First an experimental investigation has been conducted on the behavior of cylindrical specimens under axial compression loading, concrete is initially exposed to a temperature of  $600\text{C}^\circ$  to the intense cracking, then repaired by bonding a composite fiber fabric CFRP and GFRP. The obtained results in this section have concluded that repair of damaged concrete us under the effect of temperature using FRP can catch the damaged concrete resistance and fall times even exceed its initial strength by nine (09) MPa in the case of carbon fibers. However, due to the relatively high sensitivity of these composites materials to high temperatures and fire, which makes it totally unnecessary reinforcement, a second experimental part was carried out to address this problem by using a layer of cementitious material. Concrete specimen have reinforced with FRP, protected by a layer of mortar or plaster cementitious materials. The columns were tested at different temperatures. By comparing the samples confined protected and unprotected, the samples protected by a layer of plaster or cement mortar is clearly justified, when subjected to temperatures of about  $350^\circ\text{C}$ . Finally, we can say that this coating system would improve the fire resistance, the safety and reliability of concrete structures reinforced with FRP.

**Keywords:** Concrete, reinforcement, FRP composite materials, temperature, plaster, mortar.

## ملخص:

تركز هذه الأطروحة على دراسة سلوك الأعمدة الخرسانية مدعمة بالألياف الزجاجية والألياف الكربونية معرضة لدرجات حرارة عالية. أولاً تم إجراء سلسلة تجارب على سلوك عينات اسطوانية تحت ضغط محوري التحميل. في البداية عرضنا الخرسانة إلى درجة حرارة 600 درجة مئوية إلى حد التكسير، ثم إصلاحها عن طريق رابطة نسيج ألياف الكربون PRFC و نسيج ألياف الزجاج PRFV. وخلصت النتائج التي تم الحصول عليها في هذا القسم أن إصلاح الخرسانة التالفة لنا تحت تأثير درجة الحرارة باستخدام PRF يمكن تعويضها بمرات حتى تتجاوز قوتها الأولية بتسعة MPa (9) في حالة استخدام ألياف الكربون. لكن نظراً لحساسية عالية نسبياً لهذه المواد من ارتفاع درجات الحرارة والنار، تم إجراء سلسلة تجارب ثانية لمعالجة هذه المشكلة وذلك عن طريق استخدام طبقة من مادة إسمنتية. عينة معززة بنسيج الألياف PRF، التي تحميها طبقة من المواد الأسمنتية ميلاط أو الجص. حيث أن عينات الأعمدة أختبرت في درجات حرارة مختلفة. بمقارنة العينات المحمية وغير المحمية، التي تحميها طبقة من الجص أو الميلاط الأسمنتية، هذا الأسلوب للتعزيز له ما يبرره بشكل واضح عندما تتعرض لدرجات حرارة مرتفعة حوالي 350 درجة مئوية. وأخيراً، يمكن القول أن هذا النظام للحماية من شأنه أن يحسن مقاومة الحريق، وسلامة هياكل الخرسانة مع المواد المركبة.

**كلمات البحث:** الخرسانة، التعزيز، المواد المركبة PRF، درجة الحرارة، الجص، ميلاط.

## **REMERCIEMENT**

Je voudrais remercier Messieurs, **Youcef GHERNOUTI** Maitre de conférences à l'Université de Boumerdes et **Yahya SEBAIBI** Professeur à Université de Djilali liabes de Sidi Bel Abbés, pour avoir acceptés encadrer le présent travail de thèse, pour leur confiance, leur accompagnement et leurs encouragements ; toute ma gratitude pour son aide et conseils et d'être présent dans les moments les plus difficiles.

Je tiens à remercier monsieur **Abdelkrim AID** Professeur à l'Université de MASCARA pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury et pour tous les conseils qu'elle m'a souvent prodigué et pour la rigueur respectueuse qu'elle a toujours représenté.

Je souhaite adresser également mes remerciements à monsieur **Tayeb BOUZIANI** Maitre de conférences à l'Université de Laghouat fait l'honneur d'examiner mon travail.

J'adresse mes remerciements à monsieur **Habib TROUZINE** Maitre de conférences à Université de Djilali liabes de Sidi Bel Abbés, pour l'honneur qu'il m'a fait d'être examinateur de ce travail ;

Mes remerciements vont également à messieurs **Moulay Smaine GHEMBAZA** Professeur à l'Université de Djilali liabes de Sidi Bel Abbés, pour avoir accepté d'être invité de cette thèse.

Je remercie cordialement tous mes professeurs responsables de ma formation en Doctorat qui se sont dévoués à nous imprégner au domaine de la recherche scientifique et de l'enseignement supérieur.

Mes remerciements vont aussi, à tous ceux qui m'ont aidé par leur présence ou par leur soutien dans la réalisation de ce travail de recherche.

## **DEDICACE**

Je dédie ce travail à:

- L'âme de mon père,
- Ma mère,
- Ma femme et mes enfants,
- Toute ma famille,
- Tous mes amis.

# SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i> .....	01
------------------------------------	----

## *Chapitre I : Effet de la température sur le béton.*

INTRODUCTION.....	04
I.1 Description et microstructure du béton .....	04
I.1.1 Description du béton.....	04
I.1.2 Granulats.....	05
I.1.3 Pâte de ciment.....	06
I.1.4 Eau dans la microstructure du béton .....	06
I.1.5 Adjuvants.....	07
I.1.6 Interface pâte-granulats.....	07
I.2 Principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température...	08
I.3 Évolutions des caractéristiques thermiques, et mécaniques des bétons soumis à températures élevées .....	09
I.3.1 Propriétés physiques.....	09
I.3.2 Propriété thermique.....	14
I.4 Phénomènes d'éclatements.....	17
I.4.1 Problématique d'éclatement dans les bétons.....	18
I.4.2 Types des éclatements (explosive spalling).....	20
I.4.3 Mécanisme d'éclatement du béton.....	21
I.5 Paramètres influençant l'éclatement des bétons.....	22
I.5.1 Paramètres dues à la composition et propriétés de béton.....	23
CONCLUSION .....	24

## *Chapitre II : Renforcement et réhabilitation des structures en béton.*

INTRODUCTION.....	25
II.1 La nécessité d'un renforcement.....	25
II.2 Techniques de renfort des structures en béton armé.....	26
II.2.1 Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures .....	27
II.2.2 Méthode adjonction d'armature complémentaire .....	29
II.2.3 Méthode d'injection des coulis.....	31
II.2.4 Méthode de béton projeté .....	32
II.2.5 Méthode d'adjonction de matériaux composites.....	33
II.3. Le polymère renforcé de fibre (PRF).....	34
II.3.1 Histoire des PRF dans le domaine de construction .....	34
II.3.2 Caractéristiques des PRF .....	35
II.3.3 Principe de renforcement par des PRF :.....	36
II.3.4 Lois de comportement du béton confiné en compression.....	37
II.3.5 Mécanisme de confinement .....	39
II.4 Contribution du PRF au renforcement.....	40
II.4.1 Epaisseur du renforcement.....	42
II.4.2 Adhésion entre le béton et le PRF.....	42
II.4.3 Application du PRF.....	43
II.5 Etude antérieures des techniques de réparation.....	44
II.6 Durabilité environnemental des PRF.....	45
II.6.1 Durabilité sous climat froid.....	46

II.6.2	Durabilité en milieu corrosif .....	46
II.6.3	Rayons ultraviolets.....	47
II.6.4	Température.....	48
II.6.5	Résistance au feu .....	49
	CONCLUSION .....	51

### **Chapitre III : Matériaux composites.**

	INTRODUCTION.....	52
III.1	Description des constituants élémentaires des composites.....	53
III.1.1	Fibres.....	53
III.1.1.1	Fibres de carbone.....	55
III.1.1.2	Fibres de verre.....	56
III.1.1.3	Fibres d'aramide.....	57
III.1.2	Matrice.....	59
III.1.3	Matrices époxy.....	59
III.1.4	Charges et additifs.....	60
III.2	procèdes de fabrication des produits en matériaux composites.....	61
III.3	Interface.....	62
III.4	Résistance et rigidité des matériaux composites.....	62
III.5	polymères renforcés de Fibres (PRF).....	63
III.6	Utilisation des Fibres dans la Construction.....	64
	CONCLUSION .....	66

### **Chapitre IV : Réparation du béton exposé à une température de 600°C par matériaux composites**

	INTRODUCTION.....	67
IV.1	Démarche expérimentale.....	69
IV.2	Matériaux utilisés.....	69
IV.2.1	Ciment.....	69
IV.2.2	Granulats.....	70
IV.2.3	Adjuvant.....	72
IV.2.4	Matériau composite.....	72
IV.3	Fabrication des spécimens cylindriques de béton.....	73
IV.3.1	Formulation de la composition de béton.....	73
IV.3.2	Malaxage et mise en œuvre.....	73
IV.4	Endommagement des spécimens.....	74
IV.5	Procèdes de réparation des spécimens fissurés.....	75
IV.5.1	Préparation du support béton.....	76
IV.5.2	Préparation du tissu composite.....	77
IV.5.3	Préparation de la colle : la résine (SIKA DUR 330).....	77
IV.5.4	Application du renfort.....	78
IV.6	Résultats et discussions .....	78
IV.6.1	Résultats de la perte de masses.....	79
IV.6.2	Résultats de l'essai ultrasonique.....	79
IV.6.3	Résultats de l'essai de compression.....	80
IV.6.4	Module de Young.....	86
IV.6.5	Modes de rupture des spécimens .....	86
	CONCLUSION .....	88



**Chapitre V : Efficacité des matériaux cimentaires pour la protection du béton confiné par PRF exposé à des températures élevées.**

INTRODUCTION.....	89
V.1 Travaux expérimentaux antérieurs portant sur la tenue au feu des colonnes en bétons renforcées par des PRF.....	90
V.2 Programme expérimental.....	98
V.2.1 Matériaux utilisés.....	99
V.2.2 Préparation des éprouvettes confinée par PRF.....	102
V.2.3 Protection des éprouvettes par les mortiers.....	104
V.2.4 Procédures de traitement thermique des éprouvettes préparées.....	105
V.2.5 Procédures d'essais (essai de compression axiale).....	105
V.3 Résultats et discussions.....	106
V.3.1 Effet de confinement.....	106
V.3.2 Effet de la température.....	108
V.3.3 Effet de la couche de protection.....	111
V.4 Modélisation analytique.....	117
V.4.1 Modèles de résistance pour béton confiné.....	117
V.4.2 Équation proposée.....	118
CONCLUSION.....	121
<i>Conclusion générale</i> .....	122

## LISTE DES FIGURES

### *Chapitre I : Effet de la température sur le béton.*

I.1	Béton comme matériau multiphasique.....	05
I.2	Exemple de microstructure d'une pâte de ciment ordinaire hydratée.....	06
I.3	Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.....	10
I.4	Porosité en fonction de la température de conditionnement.....	10
I.5	Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique.....	11
I.6	Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique.....	12
I.7	la perte de masse en fonction de la température.....	12
I.8	Évolution de la perte de masse en fonction de la température.....	13
I.9	évolution de la masse volumique en fonction de la température.....	14
I.10	évolution de la conductivité thermique en fonction de la température.....	15
I.11	évolution de la chaleur spécifique en fonction de la température.....	16
I.12	dilatation thermique de 3 BHP et un béton ordinaire.....	17
I.13	L'éclatement du béton lors d'un l'incendie.....	18
I.14	Photos des voussoirs du tunnel sous la Manche prises après l'incendie de 1996	19
I.15	Photos des dégâts causés par l'incendie.....	19
I.16	Exemple d'éclatement explosif d'un cylindre après le chauffage.....	20
I.17	Mécanisme écaillage par pression interne.....	21
I.18	Mécanisme écaillage par dilatation Thermique.....	22
I.19	Illustration of spalling caused by thermo-hydral processes.....	22

### *Chapitre II : Renforcement et réhabilitation des structures en béton.*

II.1	Disposition des armatures pour chemisage des fondations et des poteaux.....	28
II.2	Réparation d'un poteau par augmentation de section.....	29
II.3	Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	30
II.4	Pistolet manuel d'injection.....	31
II.5	Réparation de poutre par béton projeté.....	32
II.6	Structure renforcée par polymère renforcé de fibre (PRF).....	34
II.7	Principe d'un renforcement par matériaux composites (PRF).....	37
II.8	Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné.....	38
II.9	Effet de la pression de confinement.....	38
II.10	Effet de confinement sur le comportement du béton.....	39
II.11	Mécanisme de confinement de béton.....	40
II.12	Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge uniaxiale de compression.....	40
II.13	Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP.....	41
II.14	Influence de l'épaisseur du FRP sur le comportement contrainte/déformation.....	42
II.15	Effet de l'état de liaison sur le comportement contrainte/déformation.....	43
II.16	FRP appliqué in-situ.....	43

II.17	Effet de la corrosion sur différents éléments réparés par PRF.....	47
II.18	Tenue au feu pour différents éléments renforcés et isolés par PRF.....	49

### **Chapitre III : Matériaux composites.**

III.1	Constituants d'un matériau composite.....	53
III.2	principaux matériaux de renforts.....	54
III.3	Types des composites.....	54
III.4	Armures classiques de tissus techniques.....	55
III.5	Photo de divers tissus Unidirectionnels.....	55
III.6	Résistance mécanique des tissus de verre.....	57
III.7	Histogramme des propriétés en traction des fibres.....	58
III.8	Les différentes familles de matrices.....	59

### **Chapitre IV : Réparation du béton exposé à une température de 600°C par matériaux composites**

IV.1	Les granulats utilisés.....	70
IV.2	Courbe granulométrique des différents granulats.....	71
IV.3	Adjuvant «SUPERIOR RM34S12».....	72
IV.4	Matériau composite.....	73
IV.5	Malaxeur (bétonnière) à axe horizontal.....	74
IV.6	La cure de béton pendant 28j.....	74
IV.7	Les spécimens cylindriques après le durcissement pendant 28j.....	74
IV.8	four utilisé «linn High Therm» de température maximale 850°C.....	75
IV.9	Spécimens a l'entré et sortie de four.....	75
IV.10	Essai ultrasonique.....	75
IV.11	Spécimens avant et après l'endommagement par T°C à 90 min.....	76
IV.12	Préparation du support d'épreuve.....	76
IV.13	Préparation des tissus composites.....	77
IV.14	Préparation de la résine (SIKA DUR 330).....	77
IV.15	Application du renfort.....	78
IV.16	Variation de la perte de masse de béton exposé à température de 600 °C en fonction de temps.....	79
IV.17	Variation de la vitesse de son exposé à Température de 600 °C en fonction de temps.....	80
IV.18	Essai de compression.....	81
IV.19	Courbe moyenne contrainte – déformation de béton de référence.....	82
IV.20	Courbe moyenne contrainte – déformation de différents type de béton endommagé par la température 600 C°.....	82
IV.21	éclatement des spécimens exposés à 600 C° pendant 120 minutes.....	83
IV.22	Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du temps d'exposition à la haute température.....	83
IV.23	Courbe contrainte - déformation pour les spécimens de béton témoin et béton réparé.....	84

IV.24	Variation de la résistance moyenne à la compression de béton témoin avec béton réparé.....	85
IV.25	Variation de module de Young E du béton réparé selon le type de réparation.....	86
IV.26	Mode de rupture des spécimens de béton réparé par fibre de verre.....	86
IV.27	Mode de rupture des spécimens de béton réparé par fibre de carbone.....	87

**Chapitre V : Efficacité des matériaux cimentaires pour la protection du béton confiné par PRF exposé à des températures élevées.**

V.1	Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP.....	91
V.2	Spécimens avec déférant protection ont subi un cycle thermique .....	92
V.3	Spécimens exposés à des températures aussi basses que $- 40^{\circ} \text{C}$ ou jusqu'à 300 cycles de gel-dégel ( $- 18^{\circ}\text{C}$ à $+15^{\circ}\text{C}$ ).....	93
V.4	Effets de l'épaisseur de recouvrement et la durée d'exposition au feu à l'FRP renforcé colonnes de béton dans un incendie simulé.....	94
V.5	Variation de déformation en fonction de la force.....	96
V.6	Températures mesurées et prévues pour Poteau.....	97
V.7	Evolution du coefficient du Poisson en fonction de la température pour le béton...	98
V.8	Courbe granulométrique des différents granulats utilisés.....	100
V.9	Matériau composite.....	101
V.10	Résine utilisée.....	101
V.11	Préparation du support.....	102
V.12	Découpage de tissu.....	102
V.13	Préparation de la matrice.....	103
V.14	Application du renfort.....	103
V.15	Eprouvettes confinées.....	104
V.16	Eprouvettes confinée et protégée par plâtre.....	104
V.17	Eprouvettes confinée et protégé par mortier.....	104
V.18	Four électrique utilisée pour le traitement thermique .....	105
V.19	Cycle de traitement thermique des échantillons.....	105
V.20	Surfaçage des éprouvettes par le soufre .....	106
V.21	Installation d'essai de compression axiale .....	106
V.22	Courbe contrainte-déformation de béton ordinaire et béton confiné .....	107
V.23	Courbe contrainte-déformation du béton ordinaire (BO).....	108
V.24	Courbe contrainte-déformation de béton confiné par fibre de verre soumis à différent températures (BR-FV).....	109
V.25	Courbe contrainte-déformation de béton confiné par fibre de carbone soumis à différent températures (BR-FC) .....	109
V.26	Effet de la température sur la résistance à la compression du béton ordinaire et béton confiné .....	109
V.27	Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé à la température ambiante ( $23^{\circ}\text{C}$ ).....	112
V.28	Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé exposés à une température de $120^{\circ}\text{C}$ .....	112
V.29	Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé	

	exposés à température de 350°C.....	112
V.30	Gain ou perte de la résistance de béton confiné protégées en comparaison avec du béton confiné.....	113
V.31	Gain ou perte de la ductilité de béton confiné protégées en comparaison avec du béton confiné.....	113
V.32	Comparaison de la résistance à la compression entre béton confiné protégée soumis à haute température (350 °C), le béton confiné et béton ordinaire à la température ambiante.....	113
V.33	Aspect des spécimens de béton avant l'exposition a 350 °C.....	116
V.34	Aspect des échantillons de béton âpres l'exposition à 350°C pendant 2 heures.....	116
V.35	Évolution de confinement en fonction de la pression latérale, expose a une température comprise entre 23°C et 120°C.....	118
V.36	Évolution de confinement en fonction de la pression latérale, expose a une température de 350 °C.....	119

## LISTE DES TABLEAUX

---

### ***Chapitre I : Effet de la température sur le béton.***

I.1	Principales réactions physico-chimiques de béton soumis à haute température.....	09
I.2	Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température selon les Normes .....	15
I.3	Coefficient de dilatation thermique.....	17

### ***Chapitre II : Renforcement et réhabilitation des structures en béton.***

II.1	Etudes expérimentales avec une chemise en béton.....	44
II.2	Etudes expérimentales avec une chemise en acier.....	45
II.3	Etudes expérimentales avec une chemise en matériaux composites.....	45

### ***Chapitre III : Matériaux composites.***

III.1	Caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide.....	57
III.2	Propriétés des fibres.....	58
III.3	Caractéristiques mécaniques des résines époxydes.....	60
III.4	Propriétés mécaniques des fibres de polymère.....	64
III.6	Application des divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment.	65

### ***Chapitre IV : Réparation du béton exposé à une température de 600°C par matériaux composites***

IV.1	Composition chimique et minéralogique du ciment, en %.....	70
IV.2	Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	70
IV.3	Présentation des caractéristiques physiques des granulats.....	71
IV.4	Propriétés mécaniques des composites et la résine.....	72
IV.5	Composition de béton (kg/m <sup>3</sup> ).....	73
IV.6	Influence de la température sur la perte masse.....	79
IV.7	Résultats de vitesse du son avant et après l'endommagement des spécimens cylindriques.....	80

**Chapitre V : Efficacité des matériaux cimentaires pour la protection du béton confiné par PRF exposé à des températures élevées.**

V.1	Notation des éprouvettes .....	99
V.2	caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.....	99
V.3	Caractéristiques physiques des granulats.....	99
V.4	Formulation du béton par un mètre cube.....	100
V.5	Propriétés mécaniques des PRF.....	101
V.6	Présentation des caractéristiques de la résine.....	101
V.7	Résistance à la compression et déformation pour le béton ordinaire et confiné.....	107
V.8	Résistance à la compression et déformation de béton ordinaire à différentes températures .....	110
V.9	Résistance à la compression et déformation des bétons confinés à différentes températures .....	111
V.10	Résultats expérimentaux de béton confiné avec fibre de verre et béton confinés protégées .....	113
V.11	Résultats expérimentaux de béton confiné avec fibre de carbone et béton confinés protégées .....	113
V.12	Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques.....	119

## LISTE DES SYMBOLES

---

FRP : polymères renforcé de fibres.

FC : Fibre de carbone.

FV : Fibre de verre.

$f_{bo}$  : Résistance à la compression de béton ordinaire.

$f_{bc}$  : Résistance à la compression de béton confiné.

$f_t$  : Résistance à la traction de plâtre ou de mortier de ciment dans la direction circonférentielle..

$f_{cj}$  : Résistance caractéristique à la compression du béton âge de "j" jours.

$f_{ij}$  : Résistance caractéristique à la traction du béton âge de "j" jours.

$f_{cu}$  : Résistance ultime de béton confiné

$f_{lp}$  : Pression de confinement latéral;

$f_{bcp}$  : Résistance de béton confiné et protégé

$\sigma$  : Contrainte normale en générale.

$\epsilon_{bo}$  : Déformation maximal à la compression.

$\epsilon_u$  : Déformation ultime à la compression.

$\epsilon_{bc}$  : Déformation maximal a la compression de béton confiné.

$\epsilon_u$  : Déformation ultime à la compression de béton confiné.

$\epsilon$  : Déformation relative.

$f_{frp}$  : Résistance à la traction de FRP dans la direction circonférentielle,

$t_{frp}$  : Epaisseur de FRP,

d : Diamètre de la section cylindrique confiné en béton.

t : Epaisseur de la couche de plâtré ou de mortier de ciment,

d : Diamètre de la section cylindrique en béton.

K: Coefficient de l'efficacité de confinement;



## *Introduction générale*

---

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés en Génie Civil. Il est composé d'une pâte de ciment et de granulats. C'est un matériau poreux donc susceptible de faciliter le transport de masse par diffusion et convection. Sous l'effet de la température, la microstructure du béton subit d'importantes modifications physico-chimiques et mécaniques. En effet, lorsque le béton est exposé à des hautes températures, le chargement thermique imposé conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton induisant une évaporation de l'eau et une augmentation de la pression dans les pores. Ces mécanismes sont souvent considérés comme les principales causes de la fissuration et de l'écaillage du béton soumis à des températures élevées. Donc, un incendie peut fortement modifier le comportement du béton.

Dans le cas des incendies, il faut connaître le comportement d'un béton soumis à des températures élevées, les fissurations et la détérioration d'un béton généré par cet endommagement thermique nécessite une réhabilitation efficace et des solutions économiques, de procéder à des méthodes de réparation par suite à une inspection d'analyses et de méthodologie d'un bon diagnostic.

Ces travaux de réhabilitation ont essentiellement présenté l'avantage par rapport à la démolition puis la reconstruction, voire supprimer les pertes d'exploitation, ainsi en nous pouvons avoir des raisons principales peuvent être retenues pour une éventuelle réhabilitation et ce par ordre d'importance: la remise en conformité vis-à-vis des règlements en vigueur, les dégradations et les désordres que subissent les matériaux, les changements de fonctionnalité et l'esthétique.

Durant les dernières décennies, de nombreuses recherches sur les nouveaux matériaux ont conduit au développement des matériaux composites à base de fibres. Au début, les champs d'application de ces matériaux étaient réduits à l'aéronautique et l'industrie aérospatiale. Leur champ d'application s'est ensuite élargi à l'industrie automobile, ferroviaire, robotique, maritime et plus récemment au génie civil. Dans le domaine du génie civil, les composites

unidirectionnels sont les plus couramment utilisés (type polymère renforcés de fibres (PRF)). Ces matériaux composites présentent de nombreux avantages fonctionnels tels que: une légèreté du tissu, une mise en œuvre aisée et une liberté de formes.

Ils permettent aussi d'augmenter la durée de vie de certaines structures ou éléments structurels grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Néanmoins, ils sont très sensibles à l'élévation de température : dès que la température approche celle de transition vitreuse des fibres, de la matrice ou encore de l'adhésif, le composite se détériore: la rupture des liaisons chimiques rend le renforcement totalement inutile.

A cet effet, ce travail s'intéresse à la résolution de ce problème par l'étude de comportement sous un chargement axiale des colonnes en béton renforcées à l'aide des PRF en fibre de verre ou fibres de carbones,

Le travail présenté est une recherche expérimentale qui traite deux aspects d'une part le comportement du béton endommagé par l'effet de la température et renforcé à l'aide des matériaux composites PRF, et d'autre part le comportement de béton renforcé par matériaux composite à base de fibres de carbone (PRFC) et de verre (PRFV) protégées par une couche de mortier normal ou de plâtre sous un chargement de compression. Les colonnes renforcées et protégées ont été testées à différentes températures.

La présente thèse est subdivisée en cinq chapitres.

- Le premier chapitre est totalement consacré à une synthèse bibliographique sur les propriétés physiques, thermiques des bétons vis-à-vis de l'incendie.

- Le deuxième chapitre, présente les différentes techniques de renforcement et de réparation des structures en béton par l'utilisation de différents matériaux, en particulier les matériaux composites.

- Le troisième chapitre traitera la définition et les performances mécaniques des matériaux composites ainsi que leur composition, leurs constituants, leurs avantages et inconvénients.

L'analyse de cette recherche, nous a conduits vers l'utilisation des matériaux composites comme renfort assurant un retour de rigidité et de résistance. Ceci, justifier notre intérêt pour ces matériaux, qui seront largement développés dans la partie expérimentale.

- Le quatrième chapitre décrit une recherche expérimentale sur une contribution aux travaux réalisés sur le comportement du béton au feu et le confinement des structures en béton. L'objectif principal de ce travail est l'étude d'un béton exposé à haute température et

renforcé par des matériaux composites (PRF). Le béton est exposé à haute température de 600C° jusqu'à la fissuration intense, puis réparés par le collage d'un tissu composite en fibre de carbone PRFC et de verre PRFV.

- Le cinquième chapitre est consacré à montrer l'efficacité de la protection de béton confiné exposé à des hautes températures par une couche en matériaux cimentaires, pour cela une étude expérimentale a été réalisée pour expliquer le comportement des bétons confinés par des matériaux composites (PRFC et PRFV) et protégés par une couche de plâtre ou de mortier, soumis à différents niveaux de température.

Enfin on clôtura notre travail par une conclusion générale.

# ***Chapitre I : Effet de la température sur le béton***

---

## ***Introduction***

*L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation chimique progressive du béton qui modifie sa microstructure. Pour comprendre le comportement de ce matériau à haute température, il est nécessaire de connaître les principales modifications physico-chimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats).*

*L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats. Le but de ce chapitre est de donner des informations de base et une description qualitative du béton. En suite, on donnera une description du comportement du béton à haute températures; ceci nous permettra d'introduire les différents phénomènes qui s'entraînent lorsque le béton est soumis à des températures non-usuelles.*

### **I.1. Description et microstructure du béton**

#### **I.1.1. Description du béton**

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte est constituée à partir de ciment et d'eau, ainsi que différentes additions minérales (adjuvant, fumée de silice...). Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment, et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

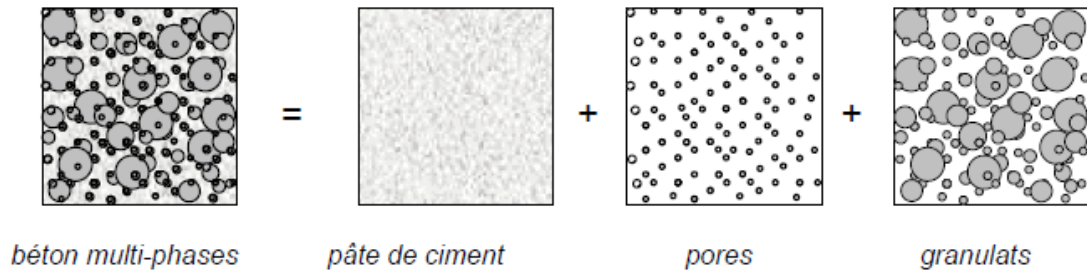


Figure I.1: Béton comme matériau multiphasique. [01]

### I.1.2. Granulats

Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton. Le terme inerte signifie que l'agrégat n'a aucune interaction avec le ciment et est inaltérable par l'eau et l'air. Ils occupent 60 à 75 % du volume de béton, et sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent :

- Sables : les grains de dimensions comprises entre 0,08 mm et 4 mm,
- Gravillon : ceux dont les dimensions sont comprises entre 4 mm et 25 mm
- Cailloux : ceux de dimensions supérieures à 25 mm.

L'influence des agrégats est très forte sur le béton en termes de performances mécaniques : en général, les agrégats présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, meilleures de celles de la pâte de ciment qui est donc le maillon faible du béton du point de vue de la résistance mécanique. Pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, le choix de l'agrégat s'avère alors très important. Il n'est pas suffisant de choisir un agrégat de bonne qualité, mais il faut aussi une granulométrie appropriée la distribution de taille des agrégats doit conduire à une réduction du volume des vides et à une optimisation de la compacité du béton. On peut classer les différents types d'agrégats selon leur origine (Naturelle ou artificielle), leur forme (plus ou moins arrondie), leur rugosité et bien entendu leur dimension. Comme pour l'eau, la présence de substances organiques ou argileuses sur la surface des agrégats s'avère importante : dans ce cas on peut avoir des effets nocifs sur la réaction d'hydratation et à l'interface pâte-granulat.

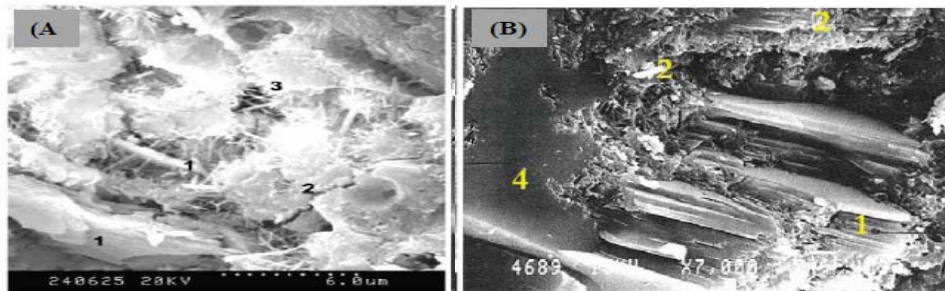
On peut avoir une mauvaise adhésion de l'agrégat à la pâte de ciment.

En ce qui concerne les propriétés thermiques de l'agrégat, il faut remarquer qu'ils n'ont pas tous un bon comportement à haute température. En général on cherche des agrégats avec un faible coefficient d'expansion thermique. Dans le cas contraire, on peut générer des contraintes et donc des fissurations. De plus, les agrégats ont la capacité d'absorber de la chaleur.

### I.1.3. Pâte de ciment

La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton. Sa microstructure est constituée d'un solide poreux et de phases liquide et gazeuse présentes dans les pores. Elle est constituée de différents composés chimiques, tels que les différents C S H, la portlandite, qui sont obtenus par réactions entre l'eau et les constituants du ciment. Elle est composée aussi de pores à différentes échelles, connectés ou non, contenant de l'eau et de l'air. Pour un béton donné, les quantités de C-S-H et de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. En moyenne, une pâte de ciment durcie ordinaire contient 50-70% de CSH et 25-27% de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante, ce qui induit une augmentation de la résistance. La microstructure de la pâte de ciment est très compliquée à cause de sa finesse. Elle peut être caractérisée par la microscopie électronique à balayage MEB et la diffraction au rayon x. L'analyse de la microstructure se fait également indirectement, à partir de la prosimètre au mercure ou des isothermes de sorption et de désorption.

La pâte de ciment présente deux types de pores, les pores capillaires et les pores des gels ou des hydrates. Les premiers (pores capillaires) sont de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$  et peuvent contenir de l'eau dans les conditions saturées cette porosité peut être affectée par le rapport E/C. Les pores des gels ou des hydrates sont à l'échelle nanométrique ( $<2\text{nm}$ ). La porosité relative aux hydrates serait caractérisée par des vides plus petits, pratiquement pas affectés par le rapport E/C et qui seraient donc une caractéristique intrinsèque des hydrates formés.



1) Cristaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 2) CSH, 3) pores, 4) Grain de ciment anhydre

**Figure I.2 :** Exemple de microstructure d'une pâte de ciment ordinaire hydratée [02].

### I.1.4. Eau dans la microstructure du béton

L'eau représente environ 15% à 20% en volume du béton ordinaire. Son rôle dans le béton est multiple.

A l'état frais, elle permet d'une part une bonne maniabilité du béton. D'autre part, elle permet l'hydratation du ciment, nécessaire à la montée en résistance du béton.

La présence d'eau dans le matériau, mais surtout son mouvement au cours de la vie de l'ouvrage, est responsable de l'apparition de phénomènes comme : retraits de dessiccation, gonflement, fissuration du béton lors des cycles gel – dégel, etc.

### **I.1.5. Adjuvants**

L'utilisation des adjuvants dans les bétons se fait généralement en faible quantité ne dépassant pas 5% de la masse du ciment. On les trouve sous forme de composés organiques aqueux formulés spécialement pour les applications béton. Les adjuvants ont pour rôle d'améliorer les propriétés du matériau à l'état frais (ouvrabilité) ou à l'état durci.

- **Plastifiants et superplastifiant** : Ils sont utilisés pour fluidifier un mélange ou pour réduire la quantité d'eau utilisée (jusqu'à 30% au moins dans le cas d'une bonne compatibilité entre l'adjuvant et le ciment).

- **Accélérateur / Retardateur de prise** : Les retardateurs de prise sont utilisés pour ralentir la vitesse de prise du matériau. Ils sont pratiques pour des transports de bétons frais sur de longues distances.

Les accélérateurs de prise ont un effet inverse de celui des retardateurs. Ils sont utilisés par temps froid ou en usine de préfabrication où il est parfois nécessaire d'accélérer la prise du béton pour procéder à un démoulage plus rapide.

- **Entraîneurs d'air** : Le béton, une fois malaxé et mis en place, contient un certain volume d'air résiduel dont la fraction volumique est généralement de 2 à 5%. Le rôle d'un entraîneur d'air est de créer un volume d'air occlus supplémentaire (sous forme de pores de petites tailles voisines les unes des autres), jusqu'à une fraction de l'ordre de 5%, avec pour objectif de rendre le matériau résistant à l'action du gel.

### **I.1.6. Interface pâte-granulats**

L'interface pâte-granulat est considérée comme l'interface la plus importante dans le Béton. C'est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée, et la moins résistante dans un béton. Lors de l'hydratation du ciment, une liaison s'établit entre la pâte de ciment et les granulats qu'elle enrobe. Elle dépend de la nature des deux phases en présence, de la teneur en ciment de la pâte de ciment et des conditions de conservation. On observe ainsi autour des granulats une zone de pâte hydratée particulière appelée auréole de transition ou zone de transition interfaciale notée ITZ (Interfacial Transition Zone). L'épaisseur de cette zone est de 50  $\mu\text{m}$  maximum, et la taille des pores varie entre 1,5 et 3  $\mu\text{m}$ , Cette faible résistance mécanique au niveau de l'auréole est due en partie à l'eau piégée sous les granulats. Les études menées sur

cette partie montrent que l'interface est constituée de fibres de CSH, d'aiguilles d'ettringite, et de plaquettes de  $\text{Ca(OH)}_2$  orientées perpendiculairement à la surface du granulat.

L'amélioration des bétons par la micro silice et notamment les BHP permet de réduire la porosité et l'épaisseur de cette zone ce qui conduit à une meilleure liaison entre la pâte et les granulats.

A haute température, L'interface pâte-granulats se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au-delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène, plus la différence entre les coefficients de dilatation thermique des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type de granulat et de ciment utilisés.

## **I.2. Principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température**

L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation chimique progressive du béton.

Les principales réactions physico-chimiques dans le béton au cours de son échauffement sont regroupées dans le tableau I.1.



Tableau I.1: Principales réactions physico-chimiques de béton soumis à haute température [03].

Entre 30 et 120 °C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170 °C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .
Autour de 180°C et jusqu'à environ 300°C	On a la première étape de la déshydratation. Il y a rupture du gel de ciment. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370°C	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).
Entre 450 et 550°C	Il y a décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570°C (573°C)	Il y a transformation de structures du quartz accompagnée d'un gonflement
Entre 600 et 700°C	Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques.
Entre 700 et 900°C	Il y a décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.
A dessus de 1300-1400°C	Le béton passe à l'état de boue

### I.3. Évolutions des caractéristiques thermiques, et mécaniques des bétons soumis à températures élevées

#### I.3.1. Propriétés physiques

##### ➤ Porosité

Lors d'une élévation de température, l'évolution de la porosité est principalement liée à la pâte de ciment mais aussi à l'interface granulats/pâte [01]. Les travaux menés sur l'évolution de ce paramètre [04], NOUMOWE A.N. (1995) [03], montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

La Figure (I.3) montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par Kalifa et al [04] par la méthode la saturation d'eau. Cette évolution est attribuée à la détérioration de la pate et de l'interface granulats/pate, puis à la déshydratation de la Portlandite [02].

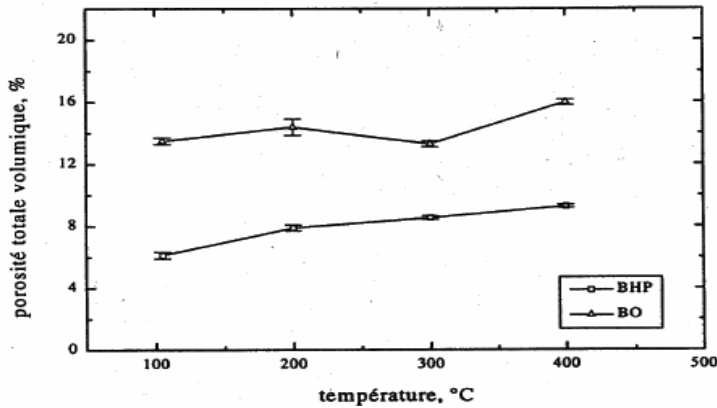


Figure I.3 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.[03]

Entre 105°C et 400°C, la porosité augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée. Kalifa explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice.

Sur la Figure (I.4) on observe la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par Noumowe sur le BO ( $R_c = 38,1$  MPa) et le BHP ( $R_c = 61,1$  MPa). Cet essai a été réalisé à l'aide du prosimètre à mercure

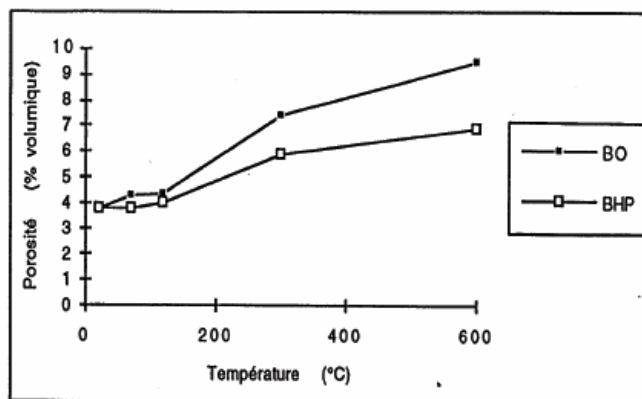


Figure I.4 : Porosité en fonction de la température de conditionnement.[03]

Entre 22 et 120°C, la porosité augmente très peu. Ceci confirme le fait qu'à cette température, l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée.

➤ **Densité apparente**

Les mesures de la densité apparente pour trois bétons BHP et du BO sont représentés sur la Figure II.5. Elle montre une légère diminution de la densité dans l'étendue des températures entre 100°C et 400°C.

Nous remarquons la différence des densités entre BO et BHP à 100°C respectivement 2.28 et 2.43 [g/cm<sup>3</sup>].

Les compositions des bétons testés M30C, M75SC, M75C et M100C correspondent aux compositions testées dans le cadre de la présente étude.

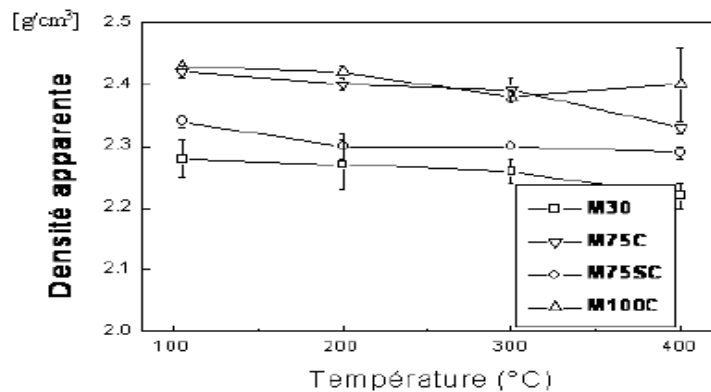


Figure I.5 : Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique.[04]

➤ **Perméabilité**

L'évolution de la perméabilité avec la température a été aussi étudiée dans le cadre du Projet National BHP 2000. La détermination de la perméabilité intrinsèque (**k**) a été réalisée à partir de la mesure de la perméabilité à l'azote (**Ka**) à l'aide d'un perméamètre à charge constante.

La mesure a été effectuée à divers gradients de pression et la perméabilité intrinsèque **k** a été déterminée selon la méthode de *Klinkenberg*.

Dans les travaux de *Zhang et al.*[07], il a été montré que la perméabilité du béton augmente avec la température de manière exponentielle. Les valeurs de la perméabilité ont été obtenues pour un béton de granulats basalte chauffé à 1°C/min et refroidi à la température ambiante. Les valeurs obtenues et la courbe d'approximation sont présentées sur (la Figure I.6.)

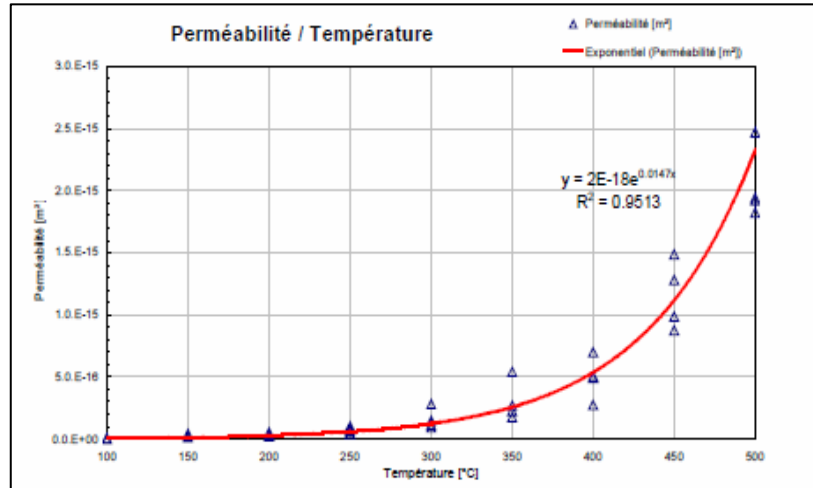


Figure I.6 : Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique.[06]

➤ Perte de masse

La perte de masse en régime transitoire de la température commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Cependant, lors du chauffage, l'eau liquide et la vapeur d'eau se mettent en mouvement et migrent vers la zone plus froide du béton. [05]

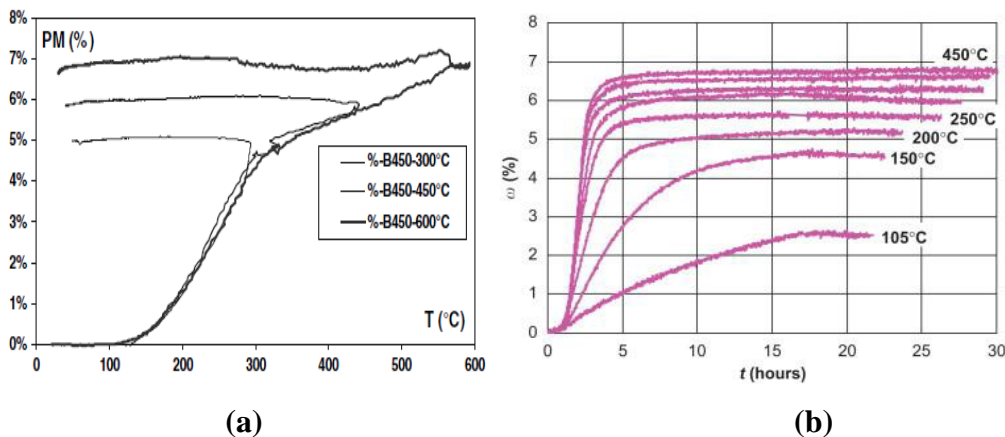


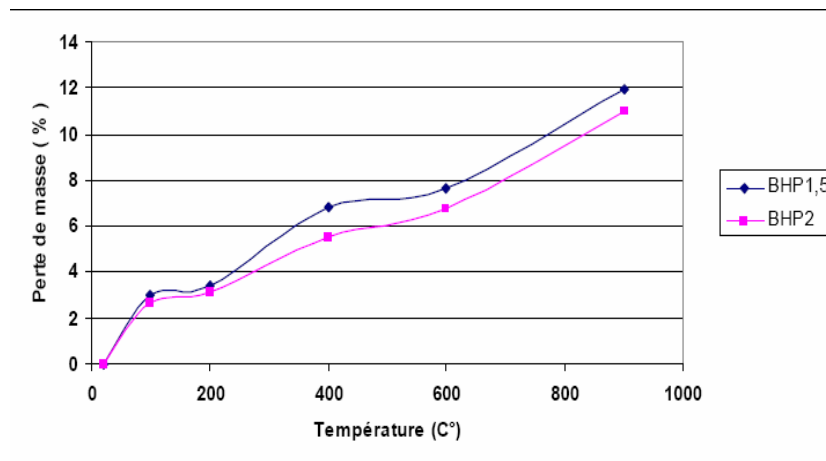
Figure I.7 : (a) Perte de masse en fonction de la température selon Kanema 2007 [06].  
(b) Perte de masse en fonction de la température et de temps, d'après Zhang 2011 [07].

Kanema et al 2007 [06] montrent une perte de masse et attribuée :

- Au départ de l'eau interstitielle (libre) existante dans le béton, pour des températures inférieures à 150°C.,
- A la décomposition des hydrates de ciment qui représente environ 65% et 80% de la quantité totale d'eau dans le béton, pour des températures comprises entre 150°C et 300°C. Zhang en

2011 [07], a montré qu'à chaque fois la température de séchage est élevée, la perte de masse est plus rapide. La Figure 3.17 présente l'influence de la température de séchage sur la perte de masse. Nous pouvons noter que, dans un premier temps, la vitesse de séchage est lente, (entre 105°C et 200°C). Ensuite la vitesse de perte de masse augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle se stabilise (entre 300°C et 450°C).

Tebbal et al en juin 2012 [08]. Ont étudié l'effet de l'ajout d'une fumée de silice sur le comportement mécanique des BHP soumis à des températures élevées. Les bétons testés sont formulés avec 5% de fumée de silice et deux dosages de super plastifiant (1,5% et 2%).



**Figure I.8** : Évolution de la perte de masse en fonction de la température [08]

Des éprouvettes ont été préalablement exposées à quatre températures, 200, 400, 600 et 900°C sans paliers intermédiaires, le cycle de mûrissement étant de 24 heures. Les résultats obtenus montrent que la résistance mécanique à 28 jours augmente avec les températures 200 et 400°C, par contre une diminution est constatée pour 600 et 900°C.

Toutefois, la composition des bétons semble avoir de grande influence sur la résistance mécanique.

Les pertes de masses mesurées à 600°C et à 1000°C sont plus grandes que la masse de l'eau de gâchage initiale contenue dans le béton qui est de l'ordre de 9% de la masse totale du béton. Ils pensent que cette différence est due peut être à la décarbonatation du béton ou d'autres gaz qui s'échappent du béton pendant le chauffage.

- L'ajout de la fumée de silice diminue le rapport C/S de la pâte et entraîne la création d'hydrates moins résistants.

➤ **Masse volumique**

La Figure 9 montre l'évolution de la masse volumique du squelette avec la température pour le BO et le BHP.

Sur cette figure on remarque une baisse de la masse volumique du squelette entre 200°C et 300°C pour le BO et le BHP. Cependant, elle est plus importante dans le cas de BO.

[04] explique que cette baisse de la masse volumique est liée aux deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation.

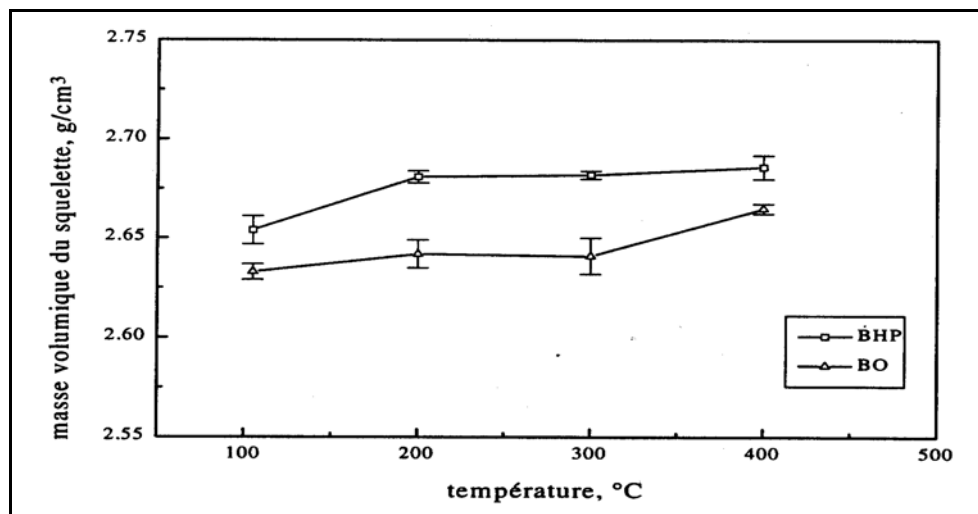


Figure I.9 : Évolution de la masse volumique en fonction de la température [04]

**I.3.2. Propriétés thermiques**

➤ **Conductivité thermique**

La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure : les microfissures limitent les transferts de la chaleur.

La teneur en eau, le type de granulat, le type de ciment et la formulation du béton sont les principaux paramètres de cette variation.

Les évolutions de la conductivité en fonction de la température proposées par le DTU [09] et l'EUROCODE 4 sont données par les formules suivantes :

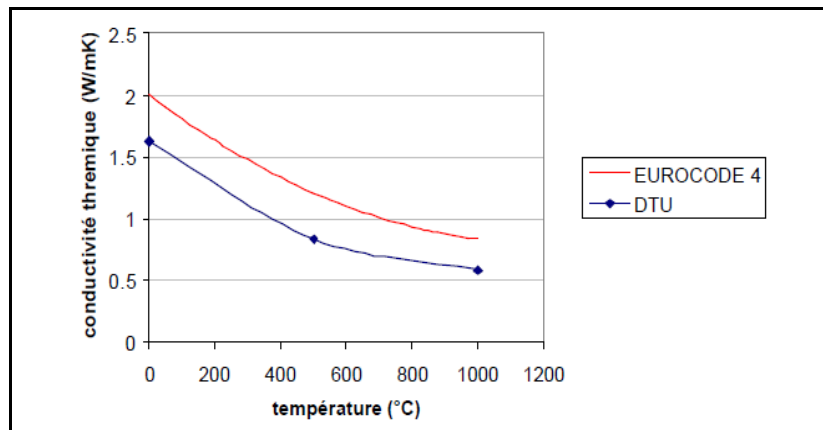
EUROCODE 4 [10]:

$$\lambda = 2 - 0,24x(T/120) + 0,012x(T/120)^2 \text{ (W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}) \text{ pour } 20^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C.}$$

**Tableau I.2: Évolution de la conductivité thermique en fonction de la température selon les Normes [09]**

DTU	Température (°C)		
	0	500	1000
$\lambda_{(kcal/m.h.^{\circ}C)}$	1,4	0,8	0,5
<i>Comme <math>1 W/m.^{\circ}C = 0,860 kcal/h.m.^{\circ}C</math> on a alors :</i>			
$\lambda_{(W/m.^{\circ}C)}$	1,628	0.833	0.581

Ces évolutions sont traduites sur les courbes suivantes.



**Figure I.10 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température [09-10].**

➤ **Chaleur spécifique**

La chaleur spécifique varie peu avec le traitement thermique. L'EUROCODE 4 [10] propose une évolution polynomiale du second degré en fonction de la température pour un béton sec, avec un pic entre 100 et 200°C caractérisant le changement de phase de l'eau contenue dans le béton. EUROCODE :  $C = 900 + 80x(T/120)^2 - 4x(T/120)^3$  (J/kgK°)

Le DTU [09] considère une valeur constante de la chaleur spécifique telle que  $C = 921$  J/kg °C. La Figure I.11 montre l'évolution de la chaleur spécifique proposée par l'EUROCODE et le DTU [09].

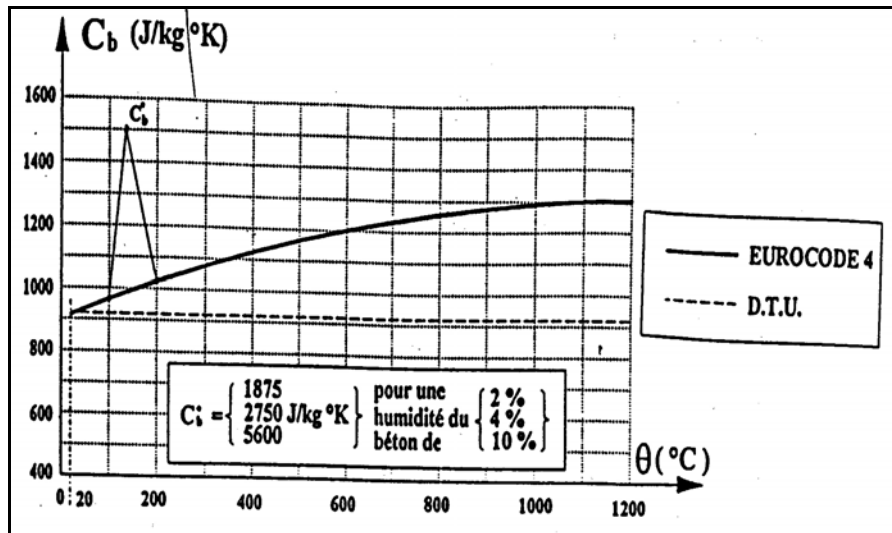


Figure I.11 : Evolution de la chaleur spécifique en fonction de la température [09-10].

### ➤ Déformation dans le béton

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargé soumise au chauffage est due essentiellement :

- à l'expansion thermique des constituants du béton,
- au retrait de dessiccation de la pâte,
- aux transformations chimiques au sein du béton,
- aux fissurations,
- à la détérioration physique des divers constituants.

### ➤ Dilatation thermique

Contrairement aux granulats, la pâte de ciment durcie se dilate seulement jusqu'à environ 150°C. Ensuite, elle subit un retrait important. Les granulats étant le principal constituant volumétrique dans le béton, son expansion thermique jusqu'à 600°C est le paramètre dominant de la déformation totale de béton. Pour des températures inférieures à 400°C, le coefficient de dilatation thermique de béton ordinaire est égal 1,1. Ceci est dû au fait que le coefficient de dilatation est plus faible. Pour des températures supérieures à 570°C, le coefficient de dilatation thermique augmente d'une manière brutale.



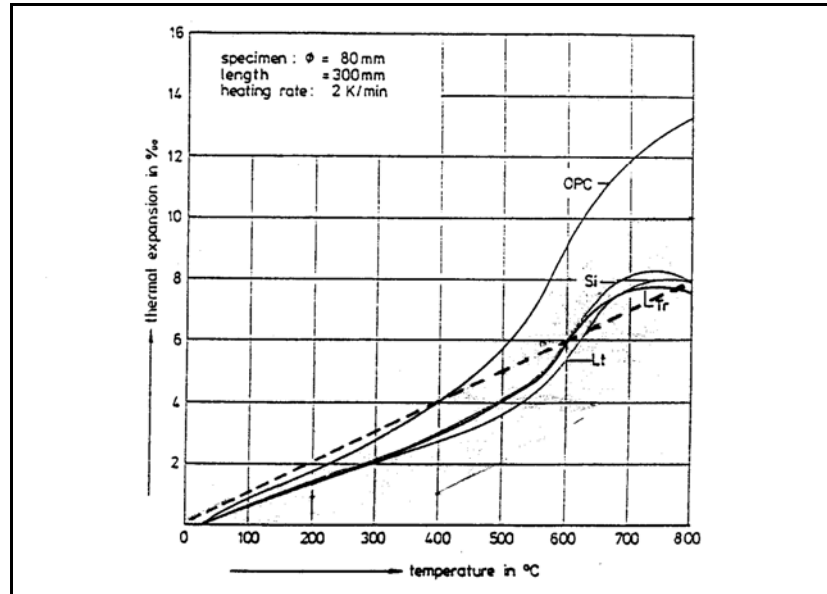


Figure I.12 : Dilatation thermique de 3 BHP et un béton ordinaire [03].

Des mesures de la dilatation thermique des éprouvettes de béton au cours du chauffage sont effectuées par NOUMOWE [03]. Les résultats de ces mesures sont portés sur le tableau 3.

Tableau suivant représente le coefficient de dilatation thermique obtenu expérimentalement. Comme les deux bétons contiennent la même nature de granulats de calcaire, leurs coefficients de dilatation ont aussi le même ordre de grandeur.

Tableau I.3 : Coefficient de dilatation thermique [03]

Température (°C)	BO ( $\times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ )	BHP ( $\times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ )
20-50	1,1	1,41
50-90	1,2	1,46
90-200	1,3	1,66
200-275	1,5	1,70

#### I.4. Phénomènes d'éclatements

Le comportement au feu des éléments de structure en béton est caractérisé par un risque d'éclatement et d'écaillage.

L'éclatement est la rupture des couches ou des morceaux de béton de la surface d'un élément de structure quand il est exposé à une grande et l'augmentation des températures rapidement connu des incendies.

L'écaillage est les petits morceaux jusqu'à 20mm dans la taille s'envolent le surface au cours de la première partie de son exposition aux feux. Généralement causée par le fractionnement

des morceaux des agrégats en raison du changement physique ou chimique à des températures élevées

#### **I.4.1. Problématique d'éclatement dans les bétons**

L'éclatement est un terme générique, couvrant les différents phénomènes de dommages qui pourraient survenir à une structure de béton lors d'un incendie.

Ces phénomènes sont causés par des mécanismes différents:

- la pression de pore augmente en raison de l'évaporation de l'eau lorsque la température augmente.
- compression de la surface chauffée en raison d'un gradient thermique dans la section transversale.
- fissuration interne due à la différence de dilatation thermique entre granulats et la pâte de ciment.
- la fissuration due à la différence de dilatation thermique / déformation entre le béton et les barres d'armature.
- La perte de force due à des transitions chimiques pendant le chauffage.



*Figure I.13 : Eclatement du béton lors d'un incendie.[14]*

Éclatement du béton lors d'un incendie cause des dommages sérieux à des structures en béton, avec des coûts économiques importants et les risques pour la vie humaine. Le problème de l'effritement (éclatement) dans les bâtiments a été connu depuis des décennies, mais a également été mis en évidence au cours des derniers incendies dans les tunnels intenses en Europe [14]. En conséquence de graves dommages à cause de l'effritement et le temps de non-fonctionnement de tunnels après un incendie, la résistance au feu des types de béton nouvellement développés a été mise en doute.

Les inspections dans les tunnels après les incendies majeurs de ces dernières années ont tous fait état de structures en béton fortement endommagées avec, à proximité des endroits les plus violemment exposés au feu, des zones de béton clairement détachées (Ulm et al. 1999 [11]; Féron et al. 2006 [12]; Bernard et al. 2007 [13]). Quelques illustrations des zones écaillées sont données en Figure I.14. et Figure I.15.

La Figure I.14 montre les endommagements provoqués par l'incendie sur les parois d'un tunnel sous la manche. Il a été observé par endroits, l'épaisseur de béton des voussoirs a totalement été expulsée. Sur la Figure I.15. on constate l'effondrement du faux plafond du tunnel du Saint Gotthard (en Suisse) sous l'effet d'un incendie en 2001, ainsi que l'endommagement de la tour Windsor à Madrid [14].



*Figure I.14 : Photos des voussoirs du tunnel sous la Manche prises après l'incendie de 1996.[11-13 ]*



*Figure I.15 : Photos des dégâts causées par l'incendie : A gauche, le tunnel du Saint Gotthard (Suisse) en 2001. A droite, la tour Windsor à Madrid en 2005.]*

#### I.4.2. Types des éclatements (*explosive spalling*)

Le phénomène d'éclatement regrouperait les quatre types suivant:

- **Éclatement de granulat:** cet éclatement est non violent, localisé en surface chauffée et ne provoque pas de dommages importants. Ce phénomène est certainement lié au caractère instable du granulat lui-même.
- **Éclatement d'angle :** forme d'éclatement également non violente, il se manifeste au niveau des angles inférieurs des retombées de poutre et dans les angles des poteaux.
- **Éclatement de surface :** couramment dénommé "écaillage": ce type d'instabilité thermique est violent dans le sens où il s'agit d'un détachement progressif et continu de petites écailles de béton qui sont expulsées avec force du parement exposé au feu. On parle parfois d'effet "pop-corn" en raison du bruit continu qui accompagne ce type d'éclatement.
- **Éclatement explosif:** il s'agit de la forme la plus violente d'éclatement des bétons. Il consiste en un détachement brutal (accompagné d'un bruit d'explosion) de pièces de béton d'une longueur de 10 à 30 cm et d'épaisseur de 1 à 2 cm. Il peut avoir lieu une seule fois lors de l'exposition au feu ou bien sous forme d'une série d'explosions. Une autre vision distingue deux sortes d'éclatement : explosif et non explosif [11-15].
- **Eclatement explosif:** c'est un éclatement souvent violent et il se produit soudainement. Les échantillons du béton testés sont intégralement désintégrés en petit morceaux. Ceci est causé par les pressions et les contraintes imposées à la structure du gel créant une énergie de déformation élevée au sein de la structure.



Figure I.16 : Exemple d'éclatement explosif d'un cylindre après le chauffage [14].

- **Eclatement non explosif:** dans ce cas les dégâts sont moins importants que le premier, où on observe des détachements de matière (petit morceaux) de la surface du béton.

### I.4.3. Mécanisme d'éclatement du béton

#### A- Ecaillage par pressions internes et contraintes thermomécanique

L'échauffement du béton est souvent accompagné d'un gradient thermique élevé, ce qui entraîne des déformations différentes entre la surface et le cœur de l'échantillon. Ces déformations induisent des contraintes thermiques très élevées. D'autre part, lorsque la température augmente, l'eau qui se trouve dans le matériau que ce soit sous forme libre ou liée s'évapore. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers l'intérieur, où la température est encore faible, et se condense. Elle forme ainsi une zone quasi-saturée qui joue le rôle d'une tranche étanche à la vapeur d'eau et c'est à proximité de cet endroit que la pression dans les pores atteint son maximum. Ce pic peut atteindre des valeurs très importantes et induit des contraintes hydriques importantes.

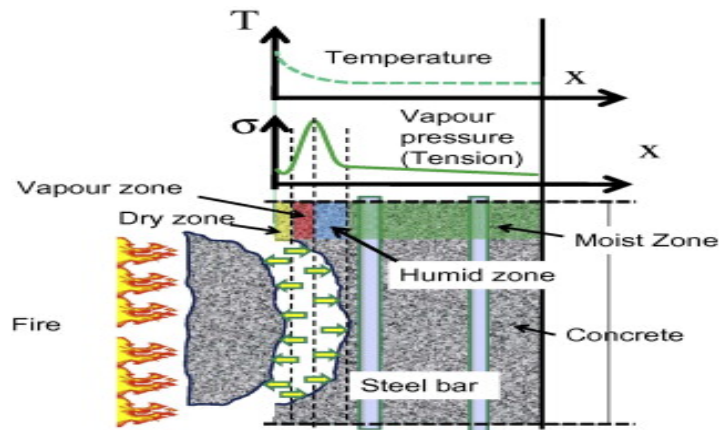


Figure I.17 : Spalling mechanism: vapour pressure (Mécanisme écaillage par pression interne) [16].

#### B- Ecaillage par dilatation thermique empêchée

Bazant [16] a montré que la dilatation thermique empêchée, génère des contraintes internes en compression dans la direction parallèle à la surface soumise au feu (Figure I. 3). Selon Bazant, c'est cette compression qui provoque la fissuration, tandis que les pressions internes dans la structure ne jouent qu'un rôle secondaire en influençant l'éclatement après localisation des déformations. Cette hypothèse est cohérente dans le sens où les BHP présentent un risque d'écaillage plus élevé que le béton ordinaire à cause de leur faible ductilité en compression[11].

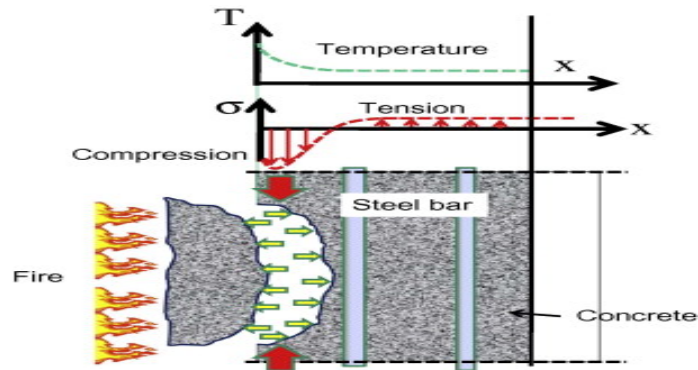


Figure I.18 : Spalling mechanism thermal dilation (Mécanisme écaillage par dilatation Thermique.) [16]

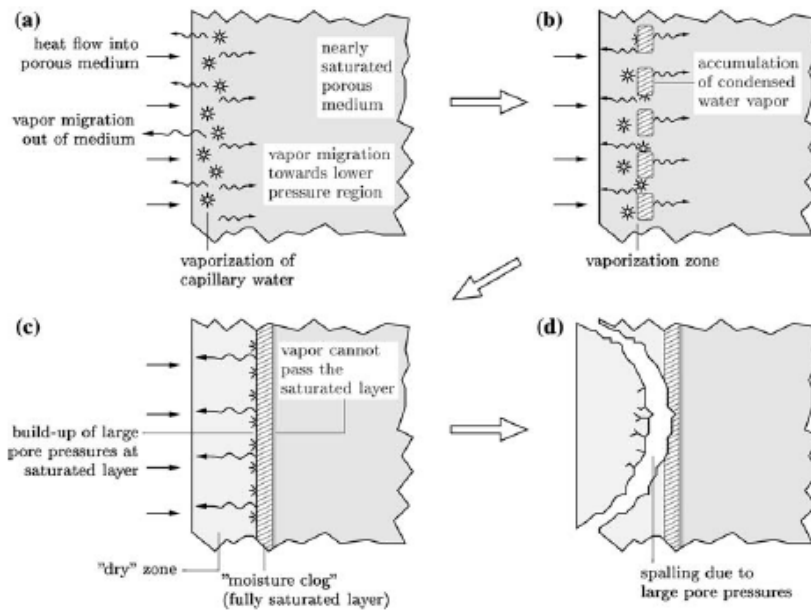


Figure I.19: Illustration of spalling caused by thermo-hydral processes [16]

### I.5. Paramètres influençant l'éclatement des bétons

D'après des études expérimentales menées par plusieurs chercheurs Khoury en 2000 [15], Hertz en 2003 [17], Hertz et al 2005 [18], De Mourais et al 2010 [19]. Les paramètres mentionnés ci-dessous peuvent augmenter la probabilité d'apparition du phénomène d'éclatement.

### **I.5.1. Paramètres dues à la composition et propriétés de béton**

#### **↳ Densification de la pâte de ciment et la compacité du béton**

Les bétons à haute performance présentent une plus forte compacité que les bétons ordinaires. Il est montré que les bétons ayant une densité plus élevée sont plus exposés au risque d'éclatement [20].

#### **↳ Faible perméabilité:**

Une porosité faible entraîne une faible perméabilité et par conséquent un transfert de masse plus difficile et empêchant l'évacuation des pressions internes provoquées par le chauffage. Ce paramètre est lié au rapport Eau/Ciment.

#### **↳ Présence de l'eau (la teneur en eau)**

Plus la teneur en eau est élevée plus le risque d'instabilité thermique est important. L'eau présente dans le béton est considérée comme la raison principale de l'éclatement explosif. L'eau libre contribue fortement à l'apparition des pressions internes de vapeur d'eau. Plus le béton est saturé plus le risque d'éclatement augmente. Par exemple, dans l'Euro code 2 (2004) une valeur limite de la teneur en humidité de 3% en poids est recommandée, au-dessus de cette valeur le risque d'éclatement est considéré comme important

#### **↳ Nature des agrégats (taille et types)**

L'utilisation des agrégats influence l'apparition de l'éclatement de plusieurs façons. La structure et la composition minérale sont les facteurs les plus importants influençant la dilatation thermique de l'agrégat.

Le quartzite et le grès ayant une haute teneur en quartz présentent une dilatation thermique élevée, contrairement au calcaire. Menéndez 2010 [14]. a montré, à l'aide d'une étude expérimentale sur le comportement de différents types de gravier, que les graviers silex sont les seuls agrégats qui présentent une certaine instabilité thermique, dans la gamme de température de 110°C à 165 °C, par rapport aux graviers calcaire. Mais il a montré que le béton avec les agrégats silico-calcaires présentent un faible risque d'instabilité thermique.

#### **↳ Addition des fibres de polypropylène:**

L'ajout des fibres de polypropylène améliore les propriétés de béton, à savoir la perméabilité et la porosité, Plus le dosage en fibres est élevé plus le risque d'éclatement est faible.

## **Conclusion**

*La synthèse bibliographique du comportement du béton porté en température nous a permis dans un premier temps de mettre en évidence certains phénomènes physiques, qui peuvent apparaître notamment lors de la dégradation du matériau tel que les modifications physico-chimiques de la microstructure, l'évolution de la porosité, la taille caractéristiques des pores. Parmi les paramètres significativement influençant le comportement du matériau béton à haute température la présence de l'eau dans le matériau, sa quantité dans le béton dépend du rapport E/C et la perte de masse au cours de chauffage.*

*Nous pouvons conclure que l'augmentation de la température rend le matériau moins conducteur et d'une faible diffusivité.*

*Nous avons constaté une chute de résistance en compression et en traction et module d'élasticité à partir de certaines températures entre 200°C et 400°C, Au-delà de 600°C, le béton peut perdre la majorité de ces propriétés c.-à-d. qu'il y a des propriétés qui peut s'annulés on peut dire que le béton est devenue faible.*



## ***Chapitre II : Renforcement et réhabilitation des structures en béton***

---

### ***Introduction***

*Le projet d'une structure consiste à définir avec précision chacun des éléments qui la composent ainsi que la manière de la construire, le tout en accord avec son usage ou sa fonction finale. Si une structure est bien conçue et correctement exécutée, elle n'aura besoin d'aucun renforcement au moment de sa mise en service. Cependant, suite à des erreurs dans le projet ou dans l'exécution, ou suite à diverses circonstances lors de la vie en service (chargements maximums dépassés, changement des conditions d'exploitation, fluage, fatigue, incendies, attaques chimiques dues à l'environnement...), des renforts peuvent s'avérer nécessaires.*

*Dans ce chapitre nous présentons les méthodes les plus utilisées dans le domaine de renfort des structures. Il s'agit principalement des techniques de renfort avec une incorporation de profils métalliques, ou bien une modification de la section structurelle et la plus récente qui utilise des matériaux composites en tant que renfort externe.*

#### **II.1. La nécessité d'un renforcement**

*Les causes qui conduisent à un renforcement structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier.*

*Les plus fréquentes sont :*

- ❖ *Accroissement des charges qui sollicitent la structure :*
  - *changement d'usage de la structure (ex : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),*
  - *augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel),*

- *installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.*
- ❖ **Défauts dans le projet ou dans l'exécution :**
  - *armature insuffisante ou mal placée,*
  - *mauvais matériaux,*
  - *dimensions insuffisantes des éléments structurels.*
- ❖ **Rénovation des structures anciennes :**
  - *prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),*
  - *connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période,*
  - *vieillesse des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.*
- ❖ **Changement de la forme de la structure :**
  - *suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,*
  - *ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.*
- ❖ **Dégâts dans la structure :**
  - *corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,*
  - *impacts contre la structure,*
  - *incendies.*
- ❖ **Nécessité d'améliorer les conditions en service :**
  - *diminuer les déformations et flèches,*
  - *réduire la contrainte des armatures,*
  - *diminuer l'ouverture des fissures.*

## **II.2. Techniques de renfort des structures en béton armé**

La décision de procéder aux réparations peut être prise afin d'atteindre un ou plusieurs des objectifs suivants (ACI, 1984) [21]:

- *rétablir ou augmenter la résistance;*
- *rétablir ou augmenter la dureté;*
- *augmenter la performance;*
- *procurer une étanchéité;*
- *améliorer l'apparence de la surface de béton;*

- améliorer la durabilité;
- prévenir l'attaque d'agents corrosifs des barres d'armature.

Plusieurs facteurs vont influencer le choix de la méthode de réparation. Ces facteurs peuvent être d'ordre technique, économique ou pratique. Par exemple, les méthodes de réparation applicables vont changer selon le type de dégradation, l'emplacement et le budget alloué. Dépendant de la nature des dommages, on peut avoir recours à plusieurs méthodes de réparation simultanément. [22].

### **II.2.1. Méthode traditionnelle d'augmentation des sections avec ou sans armatures**

L'objectif de la méthode consiste à améliorer la ductilité du poteau ou de l'ensemble de la structure en confinant le béton dans les zones critiques. En effet ces zones proches des nœuds sont souvent insuffisamment frettées. Les cadres empêchent également les armatures de flamber. Il faut néanmoins veiller à ne pas augmenter la raideur des poteaux traités, sinon ils vont reprendre plus de charges et risquent de devenir sous dimensionnés. Une solution consiste à utiliser seulement des cadres, sans armatures longitudinales de sorte que l'augmentation de résistance en flexion apportée par le renforcement soit négligeable.

Garantir la localisation des rotules plastiques. On utilise un ferrailage classique (longitudinal et cadres), pour renforcer aussi la résistance du poteau en flexion dans le but de sur dimensionner le poteau; on souhaite en effet que les rotules plastiques se forment dans la poutre. Cette technique entraîne une redistribution des efforts du fait que le poteau a une plus grande raideur; il faut alors vérifier l'ensemble de la structure par un calcul d'ensemble intégrant le renforcement. Augmenter la résistance globale de la structure. Le chemisage revient à augmenter la section de béton armé. Là encore on utilise un ferrailage classique. On applique cette technique à plusieurs poteaux [23].

Il s'agit d'augmenter la section d'origine en béton à l'aide d'un coffrage de manière à envelopper l'élément existant. Le béton sera coulé dans ce coffrage.

Lorsque la détérioration du béton est importante, le remplacement du béton altéré par du nouveau béton est nécessaire. Lors de l'enlèvement des matériaux détériorés, il faut s'assurer de ne rien laisser qui pourrait empêcher l'accrochage du nouveau matériau à l'ancien. Afin de délimiter les zones à enlever, on pratique des traits de scie de 25 à 50 mm de profondeur tout autour de celle-ci et on procède ensuite à sa démolition. Parmi les nombreuses techniques d'enlèvement des matériaux, on retrouve: le brossage, le repiquage, le sablage, le décapage et le lavage.

Après l'enlèvement des matériaux, il faut nettoyer soigneusement le substrat, le nettoyage se fait à l'aide d'un jet de sable suivi d'un jet à l'eau et à l'air propulsé. Pour finir, le surplus d'eau restant à la surface du béton est éliminé en utilisant un jet à l'air [22].



*Figure II.1 : Disposition des armatures pour chemisage des fondations et des poteaux [22].*

Percer la dalle et éventuellement les poutres pour permettre le passage des armatures de continuité.

Disposer les barres de continuité et les fixer au ferrailage. Pour ce qui est du plancher bas du premier niveau, les barres de continuité doivent être scellées dans les têtes de fondation. Sceller des barres courtes dans le poteau pour assurer la continuité du ferrailage. Mettre en place le nouveau ferrailage (cadres et armatures longitudinales) et les lier aux barres de scellement, ensuite projeter le béton [23].



*Figure III.2 : Réparation d'un poteau par augmentation de section. [23]*

### **II.2.2. Méthode adjonction d'armature complémentaire**

L'objectif de la reconstitution du parement est non seulement de restaurer l'apparence du béton mais aussi d'arrêter le processus de corrosion tout en rendant à la structure son intégrité. Il s'agit de réparations à caractère discontinu, ponctuel et superficiel.

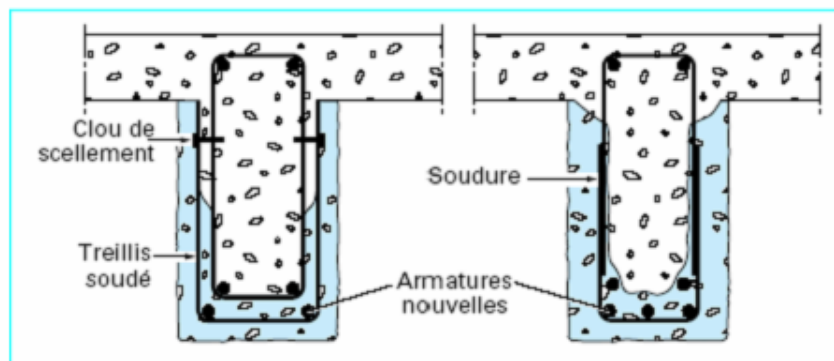
Avant de réparer les zones dégradées (armatures apparentes, éclatements de béton, traces de rouille, etc.), les revêtements en place doivent être retirés sur toute la surface par un moyen mécanique ou chimique [24].

Pour traiter les armatures corrodées, il convient de les dégager par burinage, repiquage ou bouchardage, jet d'eau ou sablage. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce qu'un acier sain apparaisse (sans trace de rouille) et la longueur de cet acier doit être dégagée sur toute sa périphérie, selon la norme NF P95 95.101 (un dégagement d'un minimum de 2 cm derrière

l'armature est conseillé). Lorsque les armatures qui ne sont pas parallèles au parement sont corrodées à leurs extrémités, le béton avoisinant doit être enlevé et ces extrémités doivent être amputées de 2 cm, pour rétablir un enrobage suffisant.

A l'étape de remplacement des armatures, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place par scellement ou soudure afin de restituer la situation initiale avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celles-ci devront être effectuées selon les normes en vigueur après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [24].



*Figure II.3: Réparation de poutre par adjonction d'armature. [24]*

La protection des armatures, consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées (périphérie complète), un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques ou esthétiques, l'enrobage ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements (BAEL 91 révisé 99, par exemple), pour un fonctionnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

Cette application doit suivre immédiatement le décapage car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation [24].

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre de mortier. Ce dernier doit respecter les critères [24]:

- de tenue verticale sans coffrage ;
- de montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support ;
- d'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support ;

- d'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs ;
- de coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité dynamique équivalent au béton support ;
- de bonne protection des aciers.

### **III.2.3. Méthode d'injection des coulis**

Coulis d'injection est un coulis à base de ciment hydraulique de très haute performance, formulé spécialement pour s'injecter dans les fissures de 1,5 à 5 mm dans la maçonnerie ou le béton.

La surface doit être propre et solide. Elle peut être sèche ou humide. Enlever les impuretés, huile, graisse et autres matières qui nuisent à l'adhérence. Pour préparer la surface utiliser un marteau piqueur ou d'autres moyens mécaniques appropriés. Placer les points d'injection. Sceller les fissures avec le produit approprié pour le type de support.

Utiliser approximativement un ratio de 4 parties de produit pour une partie d'eau potable. Utiliser un contenant propre. Verser la quantité d'eau requise premièrement et ajouter la poudre en brassant. Mélanger manuellement ou utiliser un malaxeur. Mélanger jusqu'à l'obtention de la consistance du sirop. Eviter un surplus d'eau. Eviter le brassage prolongé. Ne pas mélanger plus de produit que l'on ne peut pas installer pendant 10 minutes.



*Figure II.4 : Pistolet manuel d'injection [26]*

Pour injecter, utiliser une seringue ou cartouches d'injection jetables. Lorsque le produit de scellement a durci, injecter le coulis dans le point d'injection inférieur jusqu'au moment où le produit sort par le point d'injection supérieur. Arrêter l'injection et boucher le point d'injection inférieur. Injecter dans le point supérieur celui déjà bouché. Répéter l'opération en montant jusqu'au dernier point d'injection. Laisser le coulis durcir au moins 3 heures.

Enlever les points d'injection. Finir la réparation avec le même produit utilisé pour le scellement des fissures.

#### II.2.4. Méthode de béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (figure 2-12). Une description détaillée de cette technique est donnée dans l'ouvrage de Resse [Resse C. et Venaut M. 1981] [25]. c'est une erreur

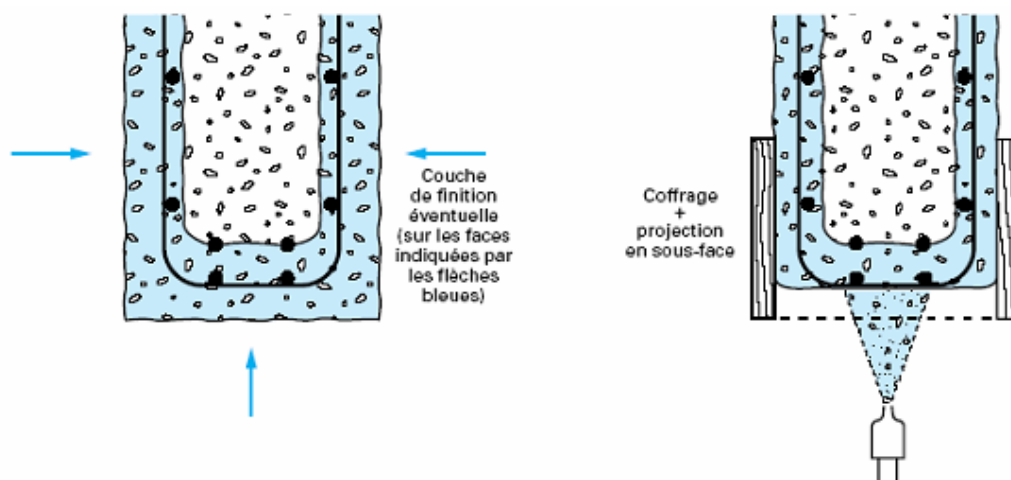


Figure II.5 : Réparation de poutre par béton projeté. [25]

Selon Resse [26], les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.



La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité) [26].

### **II.2.5. Méthode d'adjonction de matériaux composites**

Les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de conscience, de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de réhabilitation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc, par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de réhabilitation s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages. Plusieurs raisons ont permis aux matériaux composites, restés longtemps limités aux applications militaires et à l'industrie aéronautique, de s'implanter dans le domaine de génie civil. On peut citer parmi ces raisons le développement qu'a connu l'industrie des composites durant les trois dernières décennies et la crise qu'a traversé l'industrie aéronautique depuis le début des 90 ce qui avait comme conséquence une baisse des prix des composites. Aussi, le génie civil est un domaine qui nécessite trop de main d'œuvre, le coût de cette main d'œuvre dans les pays développés est devenue assez élevé de telle sorte que le prix de la matière première ne joue plus le rôle du "critère économique primordial". Ceci implique que le prix des composites ne peut plus être considéré comme un handicap, surtout aux applications de réparation et de renforcement [27].

Depuis leurs premières applications en génie civil il y a maintenant 20 ans, l'intérêt des composites s'est généralisé sur l'ensemble de la communauté internationale, groupes industriels et laboratoires de recherche, et s'est particulièrement accentuée ces dernières années si l'on juge par l'importance du nombre de publications et colloques internationaux qui traitent quotidiennement de ce sujet.

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voir en fibre de verre pour certaine applications. Il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres sous formes de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, les tissus prépréimnés ou des produits putrides.

### II.3. Le polymère renforcé de fibre (PRF)

Le terme « polymères renforcés par des fibres » appelé FRP d'après la traduction anglaise « fiber reinforced plastics » sont en voie d'être considérés comme une alternative préférable aux plaques d'acier pour le renforcement externe de certaines membrures en béton armé. [28] Les polymères renforcés de fibres (PRF) sont des matériaux composites constitués d'une matrice polymère renforcée par des fibres. Le polymère est généralement une résine époxy, vinylester ou polyester thermoplastique, ces matériaux composites (PRF), fabriqués à partir des millions de fibres continues organique et inorganiques assemblées et colées à la résine, ont des avantages incontestables par rapport aux aciers traditionnels : par exemple, une haute résistance à la traction, une excellente résistance à la corrosion, un poids volumique bas. en raison de leur très haute résistance à la corrosion, leur légèreté (qui facilite leur usage dans les processus de construction) et fait qu'il puissent être fabriqués sur mesure pour répondre aux besoins d'un ouvrage donné, ils ont déjà été employés dans importants travaux au niveau mondial. [29].

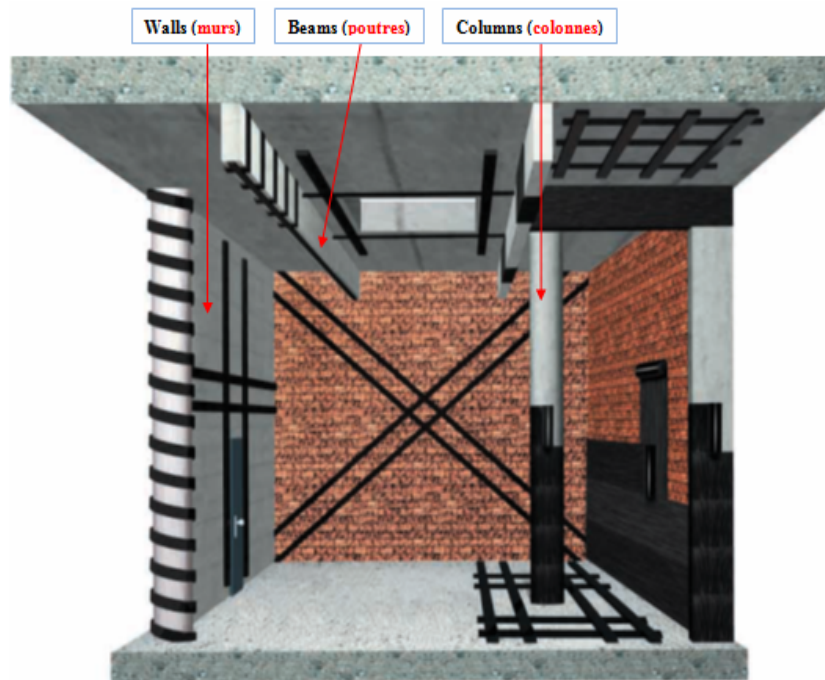


Figure II.6 : Structure renforcée par polymère renforcé de fibre (PRF). [29]

#### III.3.1. Histoire des PRF dans le domaine de construction

La maintenance des ouvrages de génie civil est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé. Le but est de réparer en assurant la performance, aussi bien du point de vue de l'économie que de la durabilité de ces ouvrages. En 1950 s'était l'apparition des premiers produits PRF utilisés comme

renforcement de béton. Il s'agissait surtout de plaques et de coques à base d'éléments tubulaires coulés.

Cette technique de renforcement par PRF est devenue depuis une vingtaine d'année, la plus efficace pour les désordres structurels est la réhabilitation des structures en béton armé par collage extérieur des matériaux composites (PRF).

Actuellement, les PRF les plus utilisés en génie civil sont les suivants : les polymères renforcés par des fibres de verre (PRFG), les polymères de tissu renforcés de Carbone (PRFC), et les polymères de tissu-renforcés d'aramide (PRFA). D'une manière générale, les matériaux composites de type polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) présentent beaucoup d'avantages dès qu'il s'agit de la protection, la réparation, le renforcement des ouvrages en béton et même le renforcement parasismique. S'il est vrai que vis-à-vis d'ouvrages métalliques, les performances mécaniques de ces matériaux semblent moins intéressantes, les évolutions des technologies (techniques de mise en œuvre, qualité des adhésifs, disponibilité de composites à haut module) laissent penser que cette méthode de réhabilitation pourrait être également davantage appliquée aux structures métalliques.

Le renforcement des ouvrages en béton par collage des PRFC sont devenus relativement courants. De nombreuses applications des PRFC sont intégrées dans le génie civil dans le monde entier. La première application du PRFC est dans la construction du pont « Strait of Gibraltar » (Meier, 1987), et plusieurs projets au Japon dans les années 80. En 1991, en l'espace de trois nuits, Meier et son équipe ont fêté la première mondiale des lamelles de PRFC lors de la rénovation du pont de l'Ibach (1913-2001) dans le canton de Lucerne dont la capacité portante avait fortement diminué (Meier, 2002). Une dizaine d'années après, en 2000, environ 1500 structures en béton dans le monde ont été renforcées par les PRFC. Aujourd'hui, cette technologie de renforcement a fait ses preuves sur d'innombrables ouvrages de construction. [30]

Compte tenu du vaste choix de fibres et de résines, joint aux multiples combinaisons de couches, d'orientations et de dispositions des fibres, les PRF ont chacun des propriétés propres. De plus, le mode de fabrication et la méthode d'ancrage à la membrure à réhabiliter ont aussi un effet sur le comportement structural des pièces renforcées.

### **II.3.2. Caractéristiques des PRF**

Un FRP consiste en deux ou plusieurs matériaux distincts combinés à l'échelle macroscopique afin de produire un produit possédant des caractéristiques qui dépassent celles de leurs composantes seules. Un FRP est une combinaison de fibres à haute résistance (les fibres de

verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisées) dans une matrice (polyester, vinylester, époxy ou autre). Le matériau ainsi obtenu est hétérogène et anisotrope. Les fibres donnent la résistance mécanique alors que la matrice unit les fibres, les protège et transfère les charges aux fibres par cisaillement.

Les plaques de PRF sont des lamines (ou stratifiées) constituées d'un certain nombre de couches appelées plis. Un pli est une couche de fibres ou de fibres tissées, imprégnées dans une matrice. Lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres dans une combinaison d'orientation définie à partir des propriétés mécaniques désirées, le produit s'appelle alors laminé.

Les fibres peuvent être disposées de différentes façons dans un pli. On distingue le pli à fibres unidirectionnelles (aussi appelé nappe unidirectionnelle), le pli à fibres tissées (appelé tissu) et le pli mat (fibres disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle).

La plus importante caractéristique des PRF est leur rapport résistance-masse élevé. On peut facilement produire un PRF dont la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier, et cela pour une masse correspondant à moins de 10 % de celle de l'acier. Les PRF ont une grande rigidité (certaines fibres de carbone à haut module ont un module d'élasticité d'environ deux fois celui de l'acier), généralement une bonne résistance à la fatigue (excepté pour les fibres de verre), une excellente résistance à la corrosion et un poids très léger. Ils sont aussi reconnus pour leur neutralité électromagnétique.

Malgré que le poids des PRF soit quatre à cinq fois inférieur à celui de l'acier, leur coût demeure relativement élevé. Par contre, l'utilisation croissante de ces nouveaux matériaux et le développement de la technologie font que les prix ont tendance à diminuer graduellement

-les PRF:

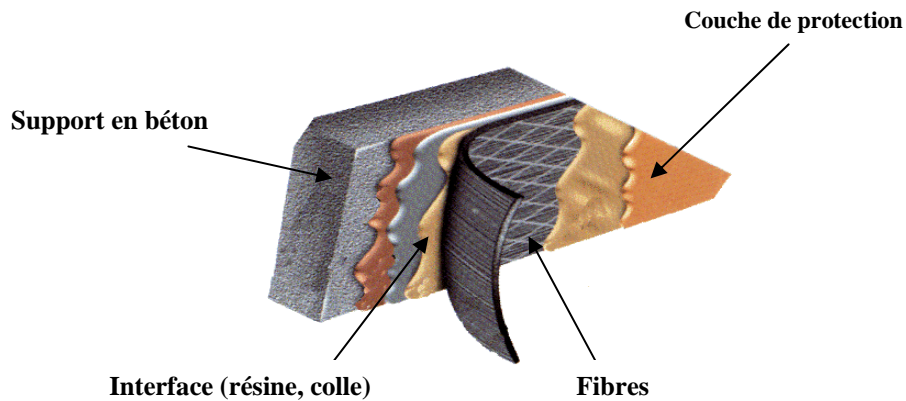
- ont un rapport résistance-masse élevé ;
- ont une résistance à la traction supérieure à celle de l'acier ;
- sont plus légers par rapport à l'acier ;
- ont une grande rigidité (module d'élasticité plus grande à celui de l'acier) ;
- ont une bonne résistance à la fatigue ;
- ont une excellente résistance à la corrosion ;
- ont un coût élevé ; [31]

### **III.3.3. Principe de renforcement par des PRF**

Avec un rapport résistance/poids très élevé (10 à 15 fois plus grand que celui de l'acier), une excellente résistance à la corrosion et à la fatigue (3 fois plus élevée que l'acier) et faible

expansion thermique, le PRF remplace de plus en plus les plaques en acier pour la maintenance des infrastructures.

Une grande difficulté dans l'application de PRF consiste à l'adhérence entre les bandes de PRF et la structure en acier ou en béton. Les comportements mécaniques, en particulier le comportement en flexion de la structure renforcée, dépendent fortement du collage, qui, avec les fissures du béton, entraîne rapidement à l'endommagement des PRF. Cela demande d'une matrice à base de résine époxy qui devient aujourd'hui indispensable dans l'utilisation de PRF.



*Figure II.7. Principe d'un renforcement par matériaux composites (PRF) [27].*

#### **II.3.4. Lois de comportement du béton confiné en compression**

Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes en béton chargées axialement augmente la résistance et la ductilité de ces colonnes d'une quantité considérable. Lorsque le béton est soumis à une compression axiale, celui-ci se déforme latéralement. Cette déformation produit une fissuration qui augmente avec l'accroissement de la charge et qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement de façon à réduire cette déformation, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées. Ce phénomène est communément appelé confinement du béton [32]. Le confinement de béton qui consiste à empêcher ces déformations, peut être réalisé soit par une enveloppe externe, soit par un faible espacement entre les étriers. La figure suivante présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression  $f_{cc} > f_{co}$  et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression  $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$ .

Le confinement augmente considérablement le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres [33] (figure II.8).

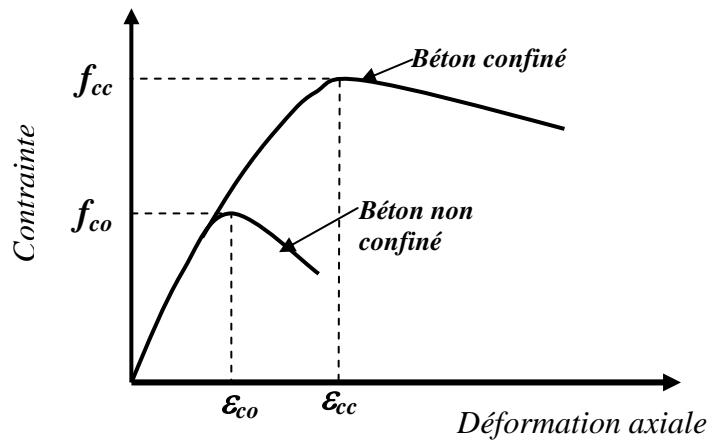


Figure II.8 : Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné [33]

La figure II.9, montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [36]. Richart, Brantzaeg et Brown [34-35], ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.

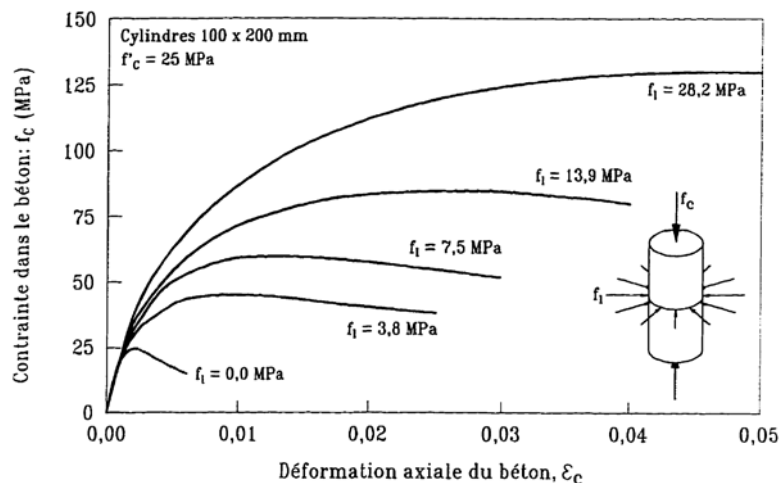


Figure II.9: Effet de la pression de confinement, [36]

Un exemple d'une étude expérimentale faite par Fam et Rizkalla (2001a) [37], L'étude a décrit le comportement des tubes de GFRP remplis de béton axialement chargés, ainsi que l'effet bénéfique de confinement dans des applications pratiques et des conditions de charge réalistes. Pour évaluer l'effet bénéfique de comportement sur toute la portance des cylindres, le comportement axial mesuré (charge-déformation) a été comparé à celui obtenu par la superposition du comportement axial du tube creux de GFRP et du noyau de béton témoin (figure II.10).

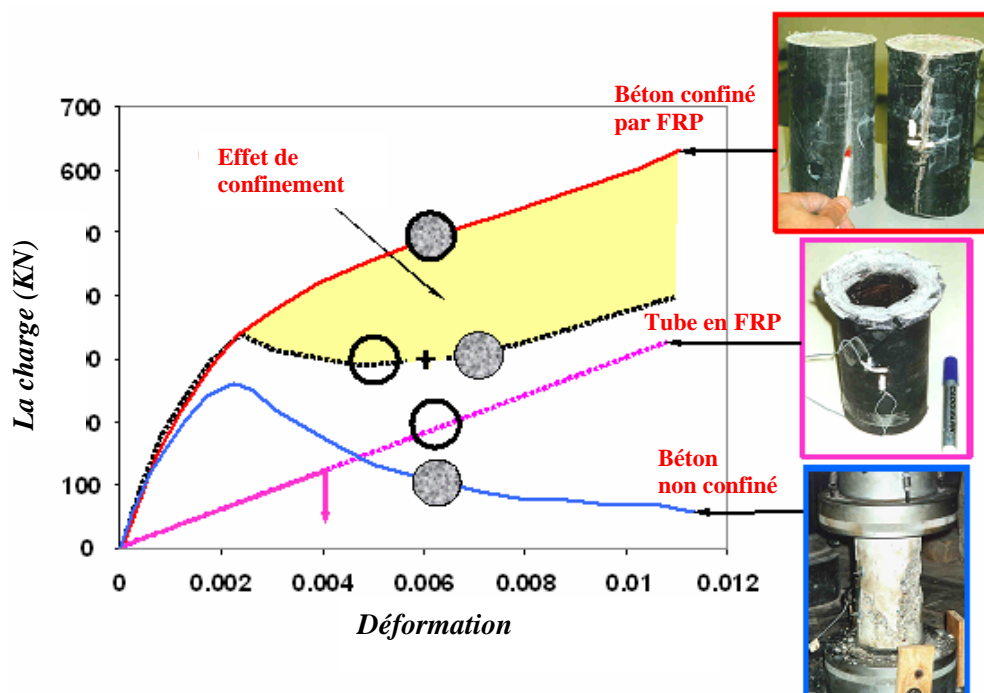
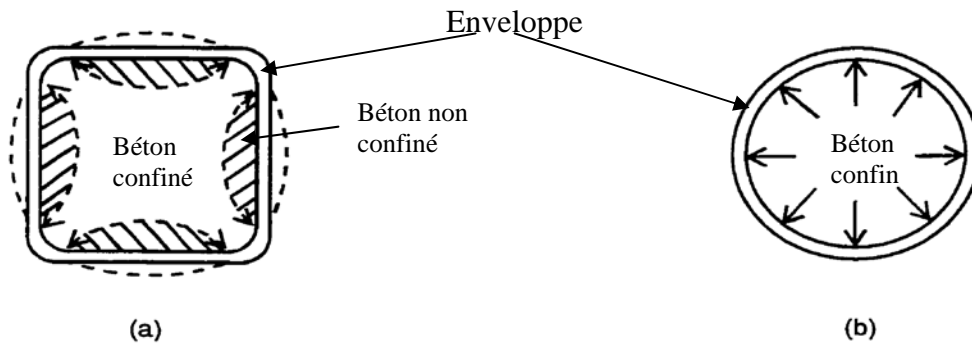


Figure II.10 : Effet de confinement sur le comportement du béton [37]

### II.3.5. Mécanisme de confinement

Dans la pratique, les colonnes sont confinées par un renfort latéral, généralement sous forme de spirales en acier étroitement aligné ou d'enveloppes. Pour un faible effort appliqué au béton, le renfort latéral est à peine soumis à une contrainte, ainsi le béton présente le comportement d'un béton non confiné. Quand les efforts approchent de la résistance uniaxiale, la fissuration interne s'intensifie et provoque des déformations latérales élevées. Le renfort latéral, applique alors une réaction d'emprisonnement au béton et par conséquent le béton présente le comportement d'un béton confiné [38]. Les enveloppes circulaires, en raison de leur forme, fournissent une pression d'emprisonnement uniforme et continue autour de la circonférence (figure II.11.b). Cependant, dans le cas d'enveloppes sous forme carré ou rectangulaire, la pression d'emprisonnement s'applique uniquement aux coins (figure II.11.a), de ce fait une partie du noyau de béton demeure non confinée [38].



**Figure II.11:** Mécanisme de confinement de béton [38]  
 (a) Section rectangulaire, (b) Section circulaire

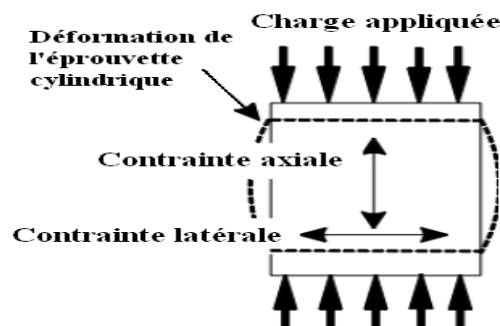
#### II.4. Contribution du polymère renforcé de fibre (PRF) au renforcement

L'encasement par un polymère renforcé de fibres d'une colonne de béton contribue à améliorer ses propriétés mécaniques. Ceci facilitera la compréhension de l'influence des différents paramètres caractéristiques du PRF sur les propriétés de confinement d'un élément de structure en béton exposée ci-après.

La littérature est riche d'analyse pour différentes structures et différentes contraintes mais nous nous limitons volontairement à l'exemple d'éléments de structure type colonne ou poteaux en béton (armé ou non) soumis à une charge uniaxiale de compression. En effet, c'est cette configuration qui sera testée dans la phase expérimentale de ce programme.

Le renforcement par FRP est une solution performante utilisée lors de réparation suite à des tremblements de terre [39-40]. De nombreuses études sont donc menées sur l'effet du renforcement sur la résistance à des contraintes excentriques comme celles rencontrées lors de tels événements mais nous ne considérerons pas ici cette thématique puisque la problématique sismique n'est pas une contrainte majeure dans nos régions.

Une éprouvette en béton soumise à une charge uni axiale de compression se dilate latéralement sous la contrainte.



**Figure II.12 :** Contrainte et déformation d'une éprouvette cylindrique soumise à une charge uni-axiale de compression [41].



L'enchérissement par un PRF permet donc de retarder la dilatation latérale de l'éprouvette de béton en la confinant, limitant la propagation de fissures internes ce qui repousse la charge nécessaire à la rupture du béton.

Le mécanisme de rupture suggère que le dimensionnement du renfort ne devrait pas être basé uniquement sur la résistance à la rupture ou sur la déformabilité de l'enveloppe de renfort et que les gains de résistance devraient être réduits selon l'augmentation de la friabilité et de l'excentricité du béton [41].

D'autres paramètres sont à prendre en compte comme nous le détaillerons ci-dessous.



**Figure.II.13 :** Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP à base de fibres de verre et de résine époxy soumis à une charge de compression [42].

Les courbes de déformation en fonction de la contrainte de compression d'éprouvettes de béton renforcées présentent trois régions distinctes [43] :

- une première zone similaire à celle d'un béton non renforcé, elle représente donc la réponse du béton à la sollicitation,
- une zone intermédiaire de transition plus ou moins importante selon la présence d'armatures,
- une troisième zone pseudo-plastique caractéristique du FRP : une fois seulement le béton endommagé le renforcement prend le contrôle des déformations de l'éprouvette et sa participation à la résistance peut être mesurée. La forme et la pente de cette droite dépendent de la rigidité du renforcement.

### II.4.1. Epaisseur du renforcement

L'épaisseur du renforcement conditionne le confinement de l'éprouvette et donc améliore sa résistance à la contrainte axiale. Il a été prouvé que, et ce quel que soit la nature du PRF, plus l'épaisseur du renforcement augmente, plus la résistance à la compression du béton enchemisé s'améliore [41].

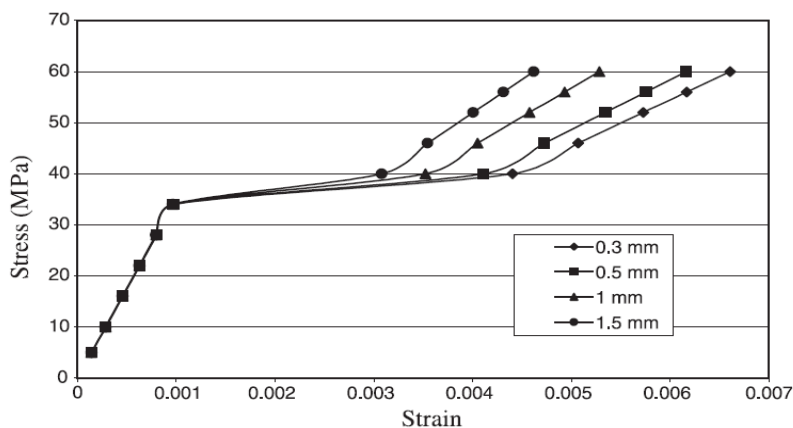


Figure.II.14 : Influence de l'épaisseur du FRP sur le comportement contrainte/déformation[43].

Cependant, les résultats d'une étude canadienne montrent que les gains en résistance ne sont pas linéairement reliés à l'épaisseur de l'enveloppe de renfort : aucune proportionnalité entre ces deux paramètres n'a donc pu être établie [44].

L'épaisseur du renfort est pourtant limitée car au-delà d'un certain nombre de couches la ductilité du renfort se trouve affectée et donc il sera moins performant car moins apte à se déformer pour confiner le béton [45].

### II.4.2. Adhésion entre le béton et le PRF

L'état de l'interface entre le béton et le FRP et plus particulièrement la liaison entre les deux éléments est évidemment un des principaux paramètres gouvernant l'efficacité du renforcement [43].

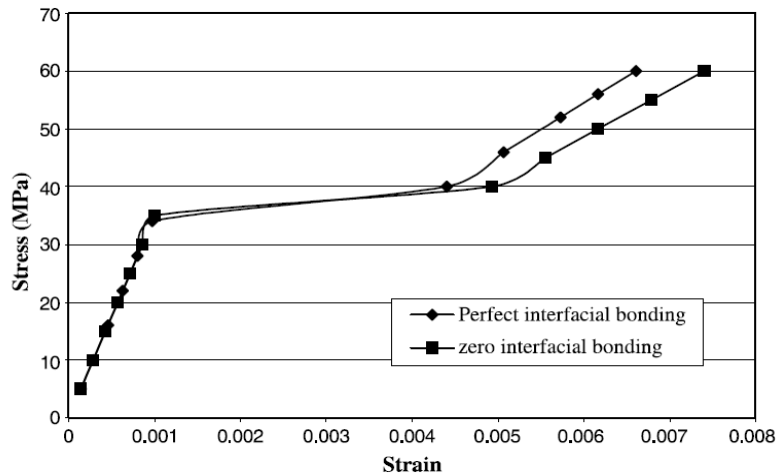


Figure.II.15 : Effet de l'état de liaison sur le comportement contrainte/déformation [43].

### II.4.3. Application du PRF

Le choix du système de renforcement dépend fondamentalement du type de sollicitations auxquelles est soumis l'élément à renforcer ainsi que ses caractéristiques géométriques et physiques.

Dans ce paragraphe seront différenciés les systèmes in-situ et des systèmes préfabriqués.

Les systèmes in-situ consistent à appliquer une « feuille » ou un tissu de fibres, unidirectionnel ou orientable, sur le substrat déjà imprégné de résine. Si besoin est, on ajoutera ultérieurement davantage de résine pour obtenir un meilleur recouvrement du tissu et ainsi augmenter son comportement mécanique.

Dans un FRP préfabriqué les fibres sont déjà absorbées dans la matrice de résine, il ne reste plus qu'à assurer son adhésion avec l'élément à renforcer. Ces éléments peuvent se présenter sous forme de bandes, plaques, chemises ou barres.

Il est aussi important de différencier les techniques courantes (de base) et particulières. Les premières consistent à appliquer le PRF, in-situ ou préfabriqué, de manière manuelle. Dans cette technique on place les fibres les plus parallèlement possibles à la direction principale des tensions.



Figure.II.16 : polymère renforcé de fibre (PRF) appliqué in-situ.

Les techniques particulières (cas limités) sont fonction de la géométrie de l'élément à renforcer. Parmi ces techniques d'application on peut mentionner celles liées à l'application d'une enveloppe automatique, de FRP précontraint, de FRP chauffé, de FRP préfabriqués de manière complexe, des « near-surface-mounted barres » ou encore l'enchemisement par mortier.

### **II.5. Etude antérieures des techniques de réparation**

De nombreuses techniques de renforcement ont été testées expérimentalement au cours des quinze dernières années. La majorité de ces renforcements ont été conçus avec l'un des trois matériaux béton, acier et matériaux composites. Dans la plupart des études expérimentales, les spécimens testés correspondaient à des poteaux en béton armé avec des armatures similaires à ceux endommagés lors des importants séismes en Californie. Chaque spécimen consiste en un poteau ancré dans une fondation surdimensionnée pour éviter toute fissuration ou rotation plastique de la semelle durant l'essai. L'objectif principal de ces essais quasi-statiques cycliques réside dans l'étude du comportement sismique (résistance, rigidité, dissipation d'énergie) de la partie poteau d'une pile de pont en béton armé. Les Tableaux suivants résument une partie des études expérimentales [46].

**Tableau II.1 : Etudes expérimentales avec une chemise en béton [47]**

<i>Géométrie de la section</i>	<i>Références</i>	<i>Remarques</i>
Carrée	Bett et al. (1987)	(1) aucune influence des armatures de ligature ancrées dans le poteau avec de l'époxy adhésive (2) augmentation de 150% du déplacement (3) rupture en flexion/cisaillement pour les spécimens renforcés
Carrée	Ersoy et al. (1991)	influence entre renforcement et réparation
Carrée	Chronopoulos (1986)	(1) évaluation entre renforcement et réparation (2) guide pratique de redimensionnement pour des poteaux endommagés

**Tableau II.2 : Etudes expérimentales avec une chemise en acier [46]**

<i>Géométrie de la section</i>	<i>Références</i>	<i>Remarques</i>
Circulaire	Marsh (1992)	influence de cycles répétés a une ductilité de 4 sur la perte en résistance et le mode de rupture
Carrée	Griezic et al.(1996)	renforcement combiné avec un déplacement de la rotule plastique
Circulaire	Chai et al(1991)	(1) les semelles conçues avec les prescriptions post 1971 sont prédisposées à une rupture en cisaillement
Circulaire Rectangulaire	Priestley et al. (1994b)	(1) augmentation du déplacement inter-étage de 5% pour un renforcement en flexion (2) augmentation du déplacement inter-étage de 4% pour un renforcement en cisaillement
Circulaire Rectangulaire	Priestley et al. (1994a)	(1) formulation de la résistance à l'effort tranchant (2) renforcement plus efficace pour une chemise circulaire/elliptique pour une section rectangulaire
Carrée	Fuse et al (1992)	(1) modification du mode de rupture en flexion (2) influence d'un coulis de ciment sans retrait
Rectangulaire	Aboutaha et al (1994)	influence des boulons d'ancrage pour le renforcement vis à vis du glissement

**Tableau II.3 : Etudes expérimentales avec une chemise en matériaux composites [46]**

<b>Géométrie de la section</b>	<b>Références</b>	<b>Remarques</b>
Circulaire	Gamble et ai. (1995)	(1) renforcement actif (rouleau d'acier précontraint) (2) renforcement passif (fibres de verre)
Rectangulaire	saadatmanesh et al (1997b)	(1) chemise rectangulaire ou elliptique (2) bandes de fibre en polymère renforcé a haute résistance
Rectangulaire Circulaire	saadatmanesh et al (1994)	étude paramétrique sur l'efficacité des bandes de fibres (carbone ou verre) composite (époxy) à haute résistance
Rectangulaire Circulaire	saadatmanesh et al (1997a)	réparation de poteaux endommagés avec des bandes de fibre plastique renforcées
Circulaire	saadatmanesh et al (1996)	(1) renforcement avec des fibres de verre renforcées avec de l' epoxy (2) comparaison confinements actif/ passif
Circulaire	Xiao et al (1997)	renforcement et réparation de poteaux avec une chemise préfabriquée en fibre de verre renforcée
Rectangulaire Circulaire	Seible et ai. (1995)	renforcement avec des bandes de fibres de et procédure de réalisation carbone
Rectangulaire	Seible et ai. (1993)	comparaison entre un renforcement avec une chemise en acier et une chemise en fibres de verre avec de l'époxy

## **II.6. Durabilité environnemental des PRF**

Les propriétés mécaniques des matériaux d'ingénierie sont d'une importance capitale pour les concepteurs en structure envisageant leur utilisation. Cependant, les considérations environnementales et de durabilité sont également importantes dans l'évaluation des matériaux et des systèmes à employer dans les infrastructures. L'exposition à une variété de conditions défavorables peut modifier de manière significative la performance mécanique des

matériaux de PRF et omettre de considérer les effets des facteurs tels que la température, l'humidité, les rayons ultraviolet, les différents produits chimiques et l'incendie peut mener à des performances insatisfaisantes. Cette section examine brièvement un certain nombre de facteurs importants qui peuvent influencer la durabilité des matériaux de PRF utilisés dans la construction. Il est important d'être conscient du fait que tous les matériaux d'ingénierie sont sensibles à différents environnements de différentes manières. Les facteurs énumérés dans cette section ne devraient en aucun cas être interprétés comme étant spécifiques aux PRF. En fait les PRF offrent des avantages de durabilité significatifs par rapport aux matériaux conventionnels tels que l'acier dans plusieurs domaines.

### **II.6.1. Durabilité sous climat froid**

La durabilité sous climat froid est éprouvée par une exposition prolongée à des températures extrêmes (- 18°C ou - 40°C) ou par des cycles (environ 300) de gel/dégel I (de -18°C à 15°C). Lors d'une exposition de longue durée au froid, la résistance mécanique du béton réparé n'est pas affectée par la température et peut même être améliorée par rapport à celle du béton de référence (béton réparé conservé à température ambiante) : cet accroissement est dû au durcissement de la matrice du FRP à basse température qui augmente la rigidité du renforcement dans la région plastique. Cependant, le mode de rupture des bétons renforcés devient fragile à basse température : la rupture est soudaine et brutale et ceci peut devenir problématique car aucun signe avant coureur n'apparaît et une simple inspection visuelle de la structure ne suffit pas à prévenir la rupture. Lors de la diminution de la température la rigidité des fibres augmente. Le transfert des contraintes de la matrice aux fibres n'est plus continu et peut devenir préjudiciable [48].

Par contre, l'alternance de gel et dégel diminue la capacité mécanique du béton enrobé par des PRF, notamment car les liaisons à l'interface entre le béton et le renforcement sont rompues suite à l'expansion puis la rétraction des matériaux avec la température qui ne se fait pas de la même manière pour le béton et le composite étant donné leurs différents coefficients de dilatation thermique. Cet effet est plus marqué pour les polymères à fibres de verre que pour ceux à fibres de carbone car plus rigides et plus sensibles à l'humidité [49].

### **II.6.2. Durabilité en milieu corrosif**

La corrosion du béton est due à la pénétration de chlorures (provenant du milieu marin, de sels de déverglaçage, etc.) ou la carbonatation du béton. Ces deux phénomènes sont gouvernés par la porosité du béton. La question est de savoir si le renforcement d'éléments fragilisés par la corrosion va stopper ou non leur corrosion.

Green et al. Soumettent différentes éprouvettes (enveloppées de PRF, non enveloppées ou enrobées en cours d'expérience) à une ambiance corrosive (solution saline à 40°C). Ils mesurent au cours du temps le courant décorrosion résultant [48].

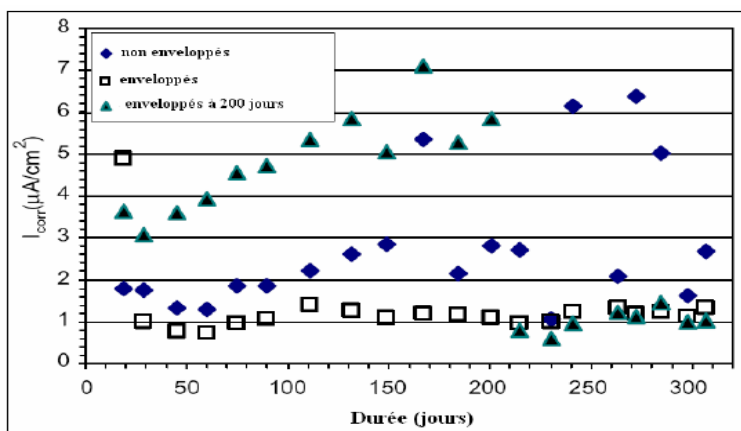


Figure.II.17 : Effet de la corrosion sur différents éléments réparés par PRF [48]

L'application de PRF, et ici même si elle survient après 200 jours de corrosion, permet de diminuer le courant de corrosion à une zone de valeurs pour lesquelles la vitesse de corrosion est très faible et non menaçante. L'action anticorrosive de l'enveloppe réside essentiellement en la barrière physico-chimique que constitue sa compacte couche de résine.

Dans le cas de renforcement d'éléments corrodés, deux techniques d'enrobage sont utilisées :

- Enveloppement après déchlorurations par des méthodes électrochimiques de l'élément,
- Enveloppement immédiat.

La première est bien sûre conseillée si le milieu environnant est particulièrement agressif et induit une corrosion rapide. La deuxième, recommandée dans des cas moins préjudiciables, nécessite néanmoins une surveillance par inspection ou monitoring des éléments réparés. Bien que l'enchemisement par PRF isole le béton du milieu extérieur et le protège ainsi de la pénétration d'agents extérieurs, la corrosion dans les éléments enveloppés perdure si le nécessaire n'est pas fait car l'humidité emmagasinée et avec tous les éléments corrosifs dissouts dans cette phase aqueuse sont désormais confinés par le renfort et prolongent leur attaque.

### II.6.3. Rayons ultraviolets

Les rayons ultraviolets (UV) peuvent endommager les matériaux de PRF. Les fibres d'aramide sont connues pour être particulièrement sensibles aux rayons UV, alors que les fibres de carbone et les fibres de verre sont résistantes à la lumière UV. De plus, la plupart

des matrices de polymère se dégraderont légèrement en raison des rayons UV. La dégradation due à la lumière UV peut être empêchée par l'utilisation de divers additifs dans la matrice, l'application d'un enduit gélifié pigmenté sur l'extérieur d'un PRF ou en appliquant sur le PRF une peinture opaque. Par exemple, dans la plupart des cas de renforcement du béton par collage extérieur de plaques ou de feuilles de PRP. La finition du PRP consiste à appliquer une peinture résistante aux UV qui ressemblent au substrat de béton et "cache" bien le matériau de réparation.

#### **II.6.4. Température**

La température est un facteur extrêmement important dans la conception et l'utilisation des matériaux de PRF dans les infrastructures. Aux températures élevées, les matériaux de polymères se décomposeront ou dans certains cas brûlent. La température en service d'un composant de PRF est donc limitée à environ 20 °C de moins que la température de transition vitreuse de verre ( $T_g$ ), pour une résine d'époxyde, ou à la température de déformation thermique, pour un vinylester ou un polyester. A ce température, on observe d'importants changements des propriétés mécaniques des matériaux de matrice de polymère qui entraînent une détérioration rapide de propriété mécanique de composant en PRF. Les températures élevées peuvent également avoir des effets important sur la durabilité à long terme de matériaux de PRF. Tel que discuté ci-dessus. Les basses températures ne constituent pas en général une préoccupation pour la matrice de polymère des PRF dans la plupart des usages structuraux, excepté dans des cas rares où les températures extrêmement basse (cryogéniques) provoquent la fragilisation des matériaux de matrice de polymère. Les effets de la température sur les PRF sont variés et complexes et la recherche sur les effets de la température sur les matériaux de PRF est en cours. Parmi ces dernier on peut citez :

- Les températures élevées augmentent le taux de fluage des matériaux de PRF
- les températures plus élevées augmentent le taux de dégradation des PRF dû aux attaques chimiques ou à l'absorption d'humidité
- la dilatation thermique différentielle (entre les fibres et la matrice, ou entre le PRF et le substrat dans les cas où le PRF est collé sur le béton, l'acier ou le bois) peut mener au développement de contraintes thermiques qui pourraient endommager l'interface matrice-fibre ou l'interface entre le PRF et le substrat. Les contraintes thermiques, dues aux différences de coefficients d'expansion thermiques (CET), varient en fonction de la nature des constituants du PRF.



La répétition de cycles thermiques et des contraintes qui en résultent peuvent endommager les matériaux de PRF par fissuration de la matrice et la rupture des fibres, ce qui peut aggraver les problèmes dus à l'absorption d'humidité et/ou à l'attaque chimique.

### II.6.5. Résistance au feu

La résistance au feu est une problématique importante car les éléments à renforcer ; qu'ils se trouvent à l'intérieur de parkings, d'habitations ou qu'ils soient des éléments de tunnels ou de ponts ; doivent garantir un maintien structurel pendant une certaine durée en cas d'incendie. D'autre part, les matériaux de construction doivent limiter au maximum la propagation des flammes et leur combustion ne doit pas générer ni de fumées toxiques ni d'émanations dangereuses. Ces points sont critiques pour des matériaux chimiques tels que les polymères renforcés de fibres.

Les FRP sont très sensibles à l'élévation de température : dès que la température approche celle de transition

vitreuse des fibres, de la matrice ou encore de l'adhésif ( $T_g$ , généralement entre 65 et 100°C pour les matériaux ici traités), le composite se détériore : la rupture des liaisons chimiques rend le renforcement totalement inutile.

En l'absence de données, les PRF sont déclarés inefficaces vis-à-vis de la résistance au feu.

Des produits spécifiques d'isolation des PRF ont été développés par des industriels pour leur conférer une tenue au feu. Ils ont été testés lors de simulation d'un incendie sur différentes colonnes en isolation d'une ou deux couches de renforts CFRP ou GFRP (respectivement numérotée 1, 2, 3 et 5 sur la figure suivante) et comparée à une colonne renforcée non isolée (colonne 4) [48]. L'isolant est un mortier contenant des fillers et des hydrofuges spécifiques.

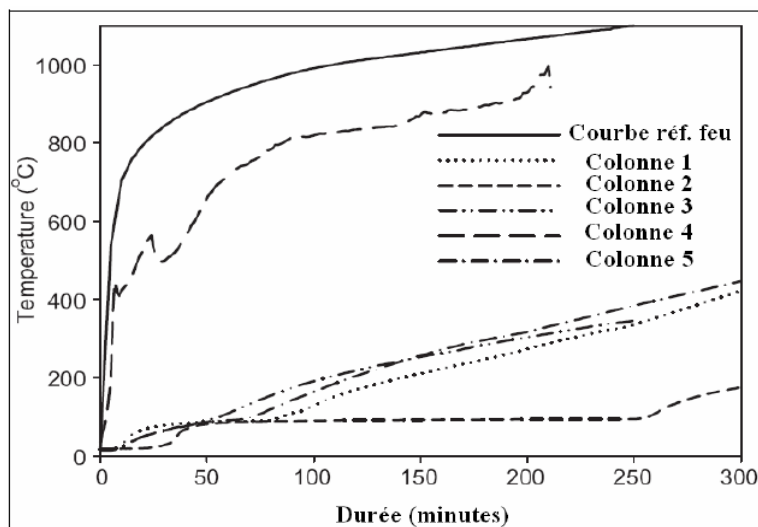


Figure II.18: Tenue au feu pour différents éléments renforcés et isolés par PRF [48]

Les résultats présentés sur la figure précédente démontrent que sans isolant la résistance au feu d'une colonne renforcée est pratiquement nulle alors qu'avec un isolant la tenue au feu de la colonne renforcée permet d'atteindre les niveaux règlementaires d'endurance. Il faut donc adapter le type de fibres, de polymère et d'adhésif en fonction de l'environnement extérieur auquel sera exposé le renforcement et des contraintes mécaniques subies par l'élément en béton. L'inspection et la maintenance sont des aspects clef pour assurer la pérennité des structures renforcées afin de prévenir tout désordre. Une inspection uniquement visuelle n'est pas envisageable car les renforcements masquent les signes de dommages (fissuration, délamination, ...) qui surviennent le plus souvent dans le béton ou à l'interface entre le béton et le renfort. Un suivi par thermographie ou radar est conseillé [50].

## **Conclusion**

*L'étude bibliographique concernant les techniques de renforcement et réhabilitation des structures en béton nous permet de formuler les conclusions suivantes :*

*- Il existe plusieurs facteurs peuvent jouer un rôle important dans les différents processus de dégradation du béton. Dans de nombreux cas, les dégâts résultent de la combinaison de divers mécanismes (chimiques, physiques et mécaniques). Donc la nécessité d'un renfort est un moyen indisponible.*

*- Avec l'essor que connaissent les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques, de plus en plus des techniques de renforcement et de réparation de structures de génie civil sont développées et proposées. Le renforcement de béton par matériaux composites, permet d'éviter tous les inconvénients mentionnés au cours de renforcement par les autres méthodes.*

*- Une grande difficulté dans l'application de PRF consiste à l'adhérence entre les bandes de PRF et la structure en acier ou en béton. Les comportements mécaniques, en particulier le comportement en flexion de la structure renforcée, dépendent fortement du collage, qui, avec les fissures du béton, entraîne rapidement à l'endommagement des PRF. Cela demande d'une matrice à base de résine époxy qui devient aujourd'hui indispensable dans l'utilisation de PRF.*

Les PRF offrent des avantages de durabilité significatifs par rapport aux matériaux conventionnels tels que l'acier dans plusieurs domaines, La durabilité des PRF dépend principalement à l'effet des facteurs tels que la température, l'humidité, les rayons ultraviolet, les différents produits chimiques et l'incendie peut mener à des performances insatisfaisantes.

## Chapitre III : Matériaux composites

---

### Introduction

Un matériau composite est constitué de deux matériaux différents et complémentaires permettant d'obtenir un matériau dont la performance dépasse celle des composants pris individuellement. Le matériau composite étudié est donc constitué de fibres qui représentent le renfort et de résine qui représente la matrice. Les comportements mécaniques et physiques peuvent être modulés en modifiant les éléments suivants :

- la nature des constituants,
- la proportion des constituants,
- l'orientation des fibres.

Les fibres procurent les principales propriétés mécaniques du matériau composite, comme la rigidité, la résistance et la dureté. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les principaux matériaux de renfort utilisés dans le domaine de la réhabilitation et du renforcement des structures de ponts ou de bâtiments.

La matrice constitue le matériau de liaison assurant la cohésion et le transfert des contraintes à l'ensemble du matériau composite, elle procure aussi une protection contre les agressions du milieu. La matrice d'époxy occupe la plus grande part du marché pour ce qui est de l'application de renforts structuraux externes. D'autres types de résines, tels que les résines à base de polyester, sont également utilisés. [51]

Les matériaux composites présentent plusieurs avantages :

- Grande résistance à la fatigue
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur et de la corrosion
- Insensibilité aux produits chimiques comme les graisses, les huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants et pétrole.

### III.1. Description des constituants élémentaires des composites

Les matériaux composites sont définis comme un arrangement de fibres noyées dans une matrice. Les principales phases élémentaires et les facteurs d'échelle entre chaque élément sont illustrés sur la figure III.1

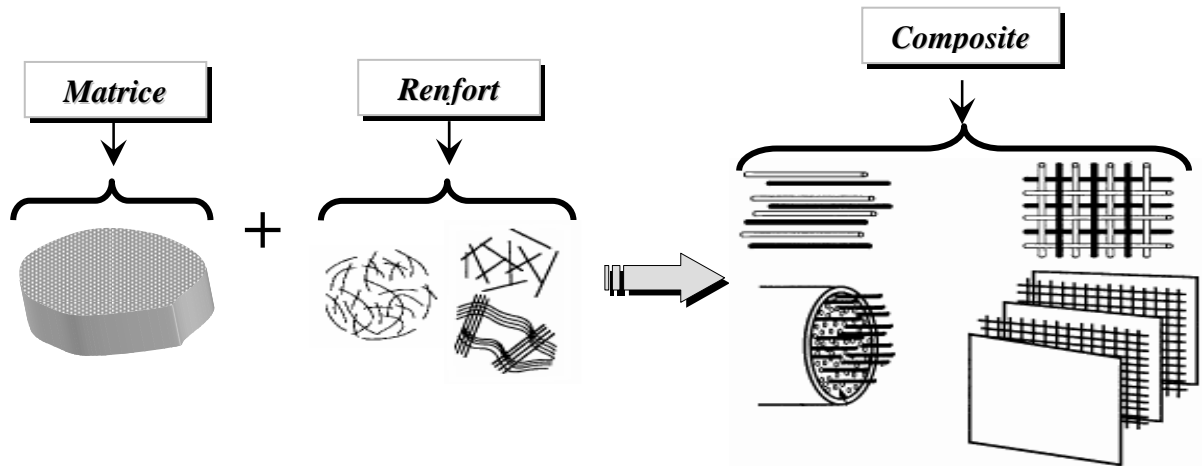


Figure III.1 : Constituants d'un matériau composite [53].

#### III.1.1. Fibres

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . Les lois de comportement des fibres sont de type "fragile". Il faut souligner le fait que les lois proposées correspondent à des essais sur mono filaments et que le comportement mécanique d'une mèche de 10 à 15000 filaments peut différer de façon significative dans la mesure où la probabilité de rupture des fils élémentaires joue un rôle important.

Les renforts se présentent le plus souvent sous la forme de fibres :

- Fibre de verre (silice...).
- Fibre de carbone
- Fibres polymères (Kevlar : coût élevé).
- Fibres métalliques (bore...).
- Fibres céramiques.

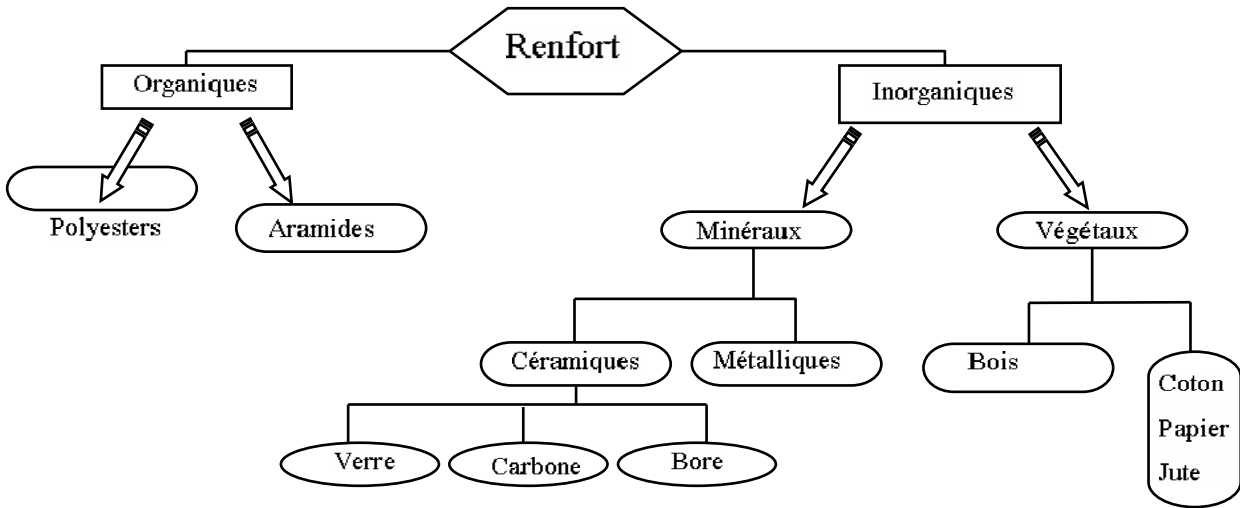


Figure III.2 : principaux matériaux de renforts [55]

Selon l'orientation des fibres, on définit deux types de matériaux composites :

- Les matériaux composites unidirectionnels

Les fibres sont orientées dans une même direction, la direction principale de contrainte (fils parallèles sans torsion dit "roving" et nappe de fils). Les matériaux sont alors anisotropes, ils ont des propriétés différentes suivant les directions de l'espace.

- Les matériaux composites multidirectionnels

Ils sont préparés à partir des types de fibres suivants:

\_ fils coupés et feutre de fils coupés dit "mat" pour une résistance multidirectionnelle aléatoire.

\_ Mat à fibres continues, tissu bi ou tri directionnel et tresse pour une résistance multidirectionnelle dans une direction privilégiée.



Figure III.3 : Types des composites

Les fils sont assemblés entre eux pour créer des mèches et une armure textile. Cette armure permet d'obtenir un matériau bidirectionnel ayant des fils dans deux directions

perpendiculaires (direction principale : sens chaîne ; direction secondaire : sens trame) (figure III.4). Généralement, les armures textiles utilisées en renforcement sont des armures unidirectionnelles ; les fils en sens trame (fil de liage) sont uniquement destinés à faciliter le conditionnement et la mise en œuvre en maintenant les fils longitudinaux en position. Ils créent toutefois des défauts géométriques en imposant une ondulation des fils dans le sens trame. Ce phénomène peut être résolu par placage d'un filet sur les nappes UD pré imprégné (figure III.5).

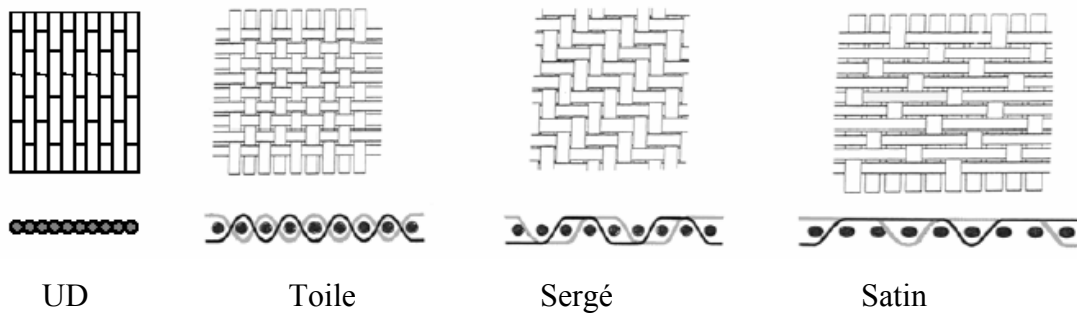


Figure III.4 : Armures classiques de tissus techniques [54]

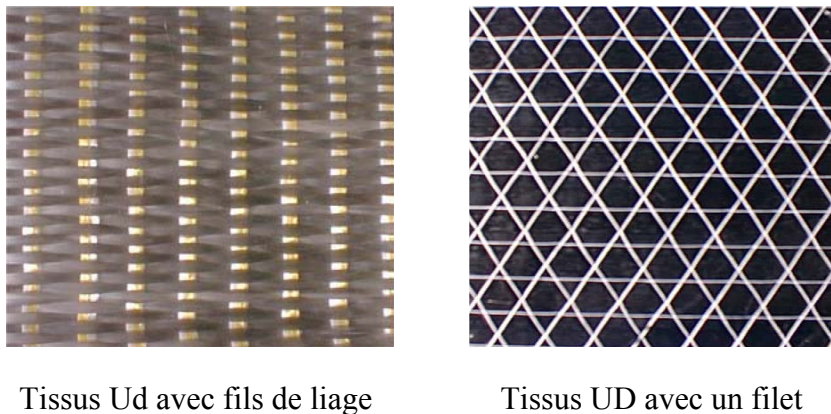


Figure III.5 : Photo de divers tissus Unidirectionnels [55]

### III.1.1.1. Fibres de carbone

Il existe deux types de fibres, celles à haute résistance (3 000 MPa) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, celles à haut module (400000 MPa) issues d'une fabrication par graphitisation. Les fibres de carbone sont fabriquées à partir du poly acrylonitrile. Les principales étapes de cette fabrication sont un étirage (orientation), une oxydation, une carbonisation et, pour obtenir une fibre à haut module, une graphitisation. La fabrication des fibres de carbone fait appel à une technologie très délicate. En effet, les caractéristiques de la fibre obtenue en fin de processus dépendent, non seulement de la qualité de la fibre

polyacrylonitrile de départ (ou précurseur), mais également du déroulement précis et rigoureux de chaque étape du procédé de fabrication suivant :

- Fabrication de précurseur (PAN),
- Étirage (orientation),
- Oxydation (220°C) dans l'air sous tension,
- Carbonisation 1500°C sous atmosphère inerte fibres de carbone haute résistance (HR),
- Graphitisation 3000 °C sous atmosphère inerte fibres de carbone haut module (HM).

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation ( $-0.7 \cdot 10^{-6} \text{ m/C}^\circ$ ). Les fibres sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques. [54]

### **III.1.1.2. Fibres de verre**

La composition du mélange initial comprend un vitrifiant, un fondant et un stabilisant qui apporte la performance recherchée (tableau III.2). C'est, par exemple, l'alumine qui apporte les hautes résistances mécaniques. Les fibres de verre sont fabriquées par étirage à grande vitesse de verre fondu à environ 1300°C. [55]

Selon les compositions chimiques des fibres de verre, on distingue les variétés E, R, S. Un pourcentage élevé de silice améliore les propriétés mécaniques des verres et élève leur température maximale d'utilisation. Des fibres de silice pure sont utilisées lorsque l'on recherche des hautes performances. La fabrication de ces fibres est plus délicate et leur prix plus élevé.

Le mélange des différents constituants choisis est porté à haute température dans un four. Les fibres de verre sont alors obtenues par fibrage à travers des filières.

La figure III.6 illustre la résistance de fibre de verre sous différentes configurations. L'utilisation de telles fibres est intéressante pour obtenir un gain de résistance, par contre lorsqu'on recherche une grande rigidité ou une grande résistance du matériau, de telles fibres sont surclassés par d'autres matériaux de renfort.



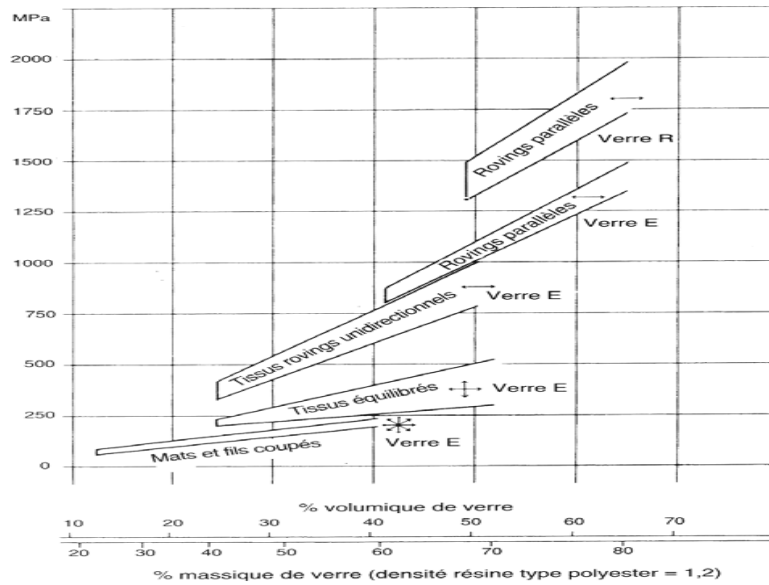


Figure III.6 : Résistance mécanique des tissus de verre [55]

### III.1.1.3. Fibres d'aramide

Il s'agit de fibres de polyamides aromatiques destinés à servir de fibre de renfort. Les fibres aramides sont des fibres polyaramides ou polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constituée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. L'élaboration des fibres est effectuée par synthèse à basse température (-10°C) puis par filage en solution.

Les fibres sont ensuite étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité.

Le module d'Young de ces fibres est égal ou supérieur à celui du verre. [55]

Il est possible de distinguer deux grandes familles de fibres aramides : les fibres dont l'allongement à la rupture est de 3.3 à 4 % et les fibres dont l'allongement à la rupture est de 1.8 à 2 %. Les fibres d'aramide présentent des caractéristiques intéressantes. Elles présentent une bonne stabilité thermique et dimensionnelle.

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau III.1 pour des mono filaments. Les caractéristiques sont plus faibles sur fils multi filaments.

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide [55]

	KEVLAR 29	KEVLAR 49	KEVLAR 149	Twaron	Technora
<b>Module d'Young (GPa)</b>	60	120	160	60	90
<b>Contrainte à la rupture (MPa)</b>	3000	3000	2400	2600	2800
<b>Allongement (%)</b>	3.6	1.9	1.5	3	4

La contrainte à la rupture spécifique est élevée (du même ordre de grandeur que le carbone HR), toutefois avec un prix de revient 4 à 6 fois moindre. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres aramides:

- Résistances faibles à la compression, à la flexion, au flambement ;
- Sensibilité au cisaillement inter laminaire.

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre matrice. Pour y remédier, un ensimage est appliqué au niveau des fibres.

De plus, la relaxation et le fluage sont très faibles. Les propriétés mécaniques sont conservées pour une plage de température comprise entre – 50°C à 300°C.

Du point de vue du vieillissement, les fibres d'aramide sont résistantes à la corrosion et à l'environnement.

Le tableau III.2 récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la figure III.7 compare la résistance en traction de différents types de fibres. [52]

Tableau III.2 : Propriétés des fibres [53]

Filament	Diamètre. (μ)	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allons. (%)	Fusion (°C)
Vère E	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
Vère D	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
Vère R	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	8	1.78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	12	1.45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1.45	3100	130000	2	480

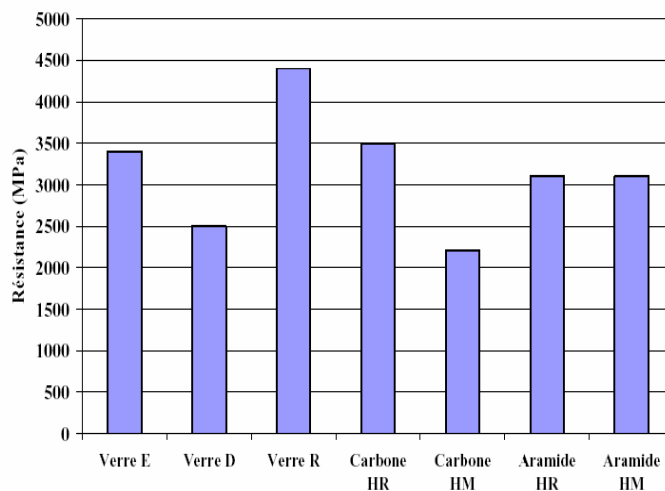


Figure III.7 : Histogramme des propriétés en traction des fibres [53]

### III.1.2. Matrice

La matrice la plus utilisée pour la fabrication des matériaux composites consiste en un matériau résineux constitué de polymères, modifié par différents adjuvants et additifs. Ces polymères ont habituellement de faibles propriétés mécaniques et leur comportement est dépendant de la durée, du taux et des cycles d'application de la charge, ainsi que de la température. On distingue deux grandes familles de résines polymères : les résines thermodurcissables (Polyester, époxy, vinylester, ...) et les résines thermoplastiques (polychlorure de vinyle, polyamide, polyéthylène, ...). En construction de génie civil, les résines thermodurcissables sont de loin les plus utilisées. [56]

Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite

Dans la figure I.8, on donne les principales familles de matrices et leurs éléments qui les constituer.

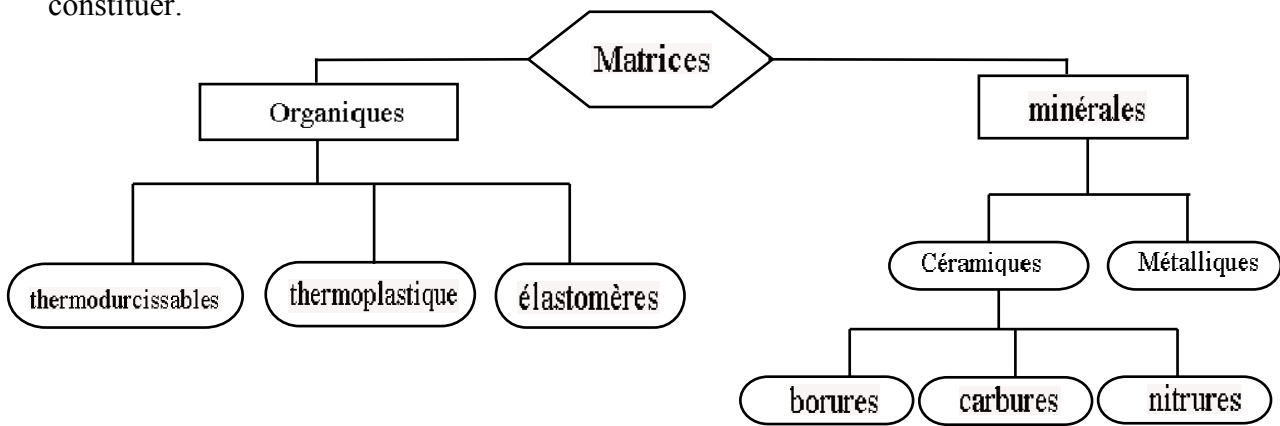


Figure III.8 : Les différentes familles de matrices [56].

### III.1.3. Matrices époxy

Les polymères époxy sont des résines thermodurcissables et qui réticulent de façon irréversible. Ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques. Les polymères époxydes sont transformés à l'aide de durcisseurs et d'accélérateurs afin d'obtenir une structure macromoléculaire tridimensionnelle. Parmi les durcisseurs, les amines aliphatiques permettent le durcissement à température ambiante. La polycondensation du système pré polymère époxyde/agent réticulant (durcisseur) conduit à la formation d'un réseau amorphe tridimensionnel. La réaction implique l'ouverture des cycles oxiranes. La réaction de réticulation peut se faire à froid avec des amines aliphatiques ou à chaud avec des amines aromatiques.

En général, les polymères durcis à chaud possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que ceux durcis à froid. [57]

Selon le type de traitement thermique, d'adjuvants et de charges, certaines propriétés sont propres à certains composés. L'un des principaux avantages des polymères époxydes provient de la réaction de polyaddition. Par définition, cette réaction se fait sans perte de matière et présente ainsi un faible retrait avec la possibilité d'obtenir, par coulée, des masses très importantes. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion.

Les polymères époxy ont de bonnes propriétés en traction, en flexion, en compression. Seule, la résistance aux chocs est un point faible (voir tableau III.3). La dureté sera plus ou moins élevée en fonction de la compacité du réseau tridimensionnel et de la présence d'adjuvants.

**Tableau III.3 : Caractéristiques mécaniques des résines époxydes [57]**

Résistance à la traction (MPa)	50 à 80
Module de traction (GPa)	3 à 10
Allongement à la rupture (%)	1 à 1.5
Résistance à la compression	140 à 150
Résistance au choc (MPa)	7 à 10 kJ/m <sup>2</sup>

Les principales caractéristiques des époxys sont :

- Une adhérence remarquable sur tous les types de support,
- Une bonne résistance à la chaleur,
- Une excellente résistance chimique aux huiles, aux hydrocarbures, à l'eau.

De plus, les polymères époxy montrent une mauvaise résistance chimique à l'acide nitrique et à l'acide sulfurique, aux cétones et une faible reprise d'humidité mais une excellente tenue à la fatigue. Les inconvénients sont un temps de polymérisation assez long sans cuisson et des mesures d'hygiène et de sécurité sévères pour éliminer les vapeurs et le contact avec la peau.

Le produit peut être stocké sans altération pendant trois mois à 20°C et jusqu'à un ou deux ans à une température de -18°C [57].

#### III.1.4. Charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières. Les quantités de produits peuvent varier de quelques dizaines de pourcentage dans le cas de charges à quelques pourcentages et moins dans le cas d'additifs. Les propriétés particulières qui peuvent généralement être améliorées portent sur les résistances mécaniques

(compression) et les propriétés de mise en œuvre (thixotropie). Nous pouvons ainsi citer en exemple les charges renforçantes qui se présentent sous formes sphériques (microbilles de verres) ou non sphériques (écailles de mica), les charges non renforçantes qui ont pour rôle de diminuer le coût de la résine et peuvent contribuer à l'augmentation de certaines propriétés (masse volumique, dureté, module d'élasticité).

Les additifs interviennent comme lubrifiants, colorants ou agents anti-ultraviolets. Il est important de noter que l'ensemble de ces ajouts modifie les propriétés physiques et mécaniques des résines.

### **III.2. Procèdes de fabrication des produits en matériaux composites**

On distingue trois grands stades communs à la formation des composites :

- 1- La Formation des matériaux constituants soient la résine et les fibres;
- 2- L'évolution intermédiaire de ces matériaux en la forme voulue;
- 3- La transformation finale par un traitement ou une cure des matériaux constituants en la géométrie désirée.

Chez les composites. L'élaboration du matériau se fait en même temps que la pièce. Il est donc difficile de séparer les propriétés de la pièce et du matériau. On distingue deux procédés de mise en œuvre; soit direct ou à partir de demi-produits. La classification de ces derniers peut se faire comme suit.

#### **- Mise en œuvre direct:**

- \_ Moulage sans pression (moulage sous vide)
- \_ Moulage par compression
- \_ Moulage en continu
- \_ Moulage par pultrusion
- \_ Moulage par centrifugation
- \_ Moulage par enroulement filamentaire
- \_ Moulage poinçon-matrice

#### **- Mise en œuvre à partir de semi-produits**

- \_ Préimprignés
- \_ Composés de moulage

Les principales méthodes de fabrication des produits en matériaux composites en génie civil sont la pultrusion, l'enroulement filamentaire, le moulage sous vide et le moulage poinçon matrice. [58].

### **III.3. Interface fibre/matrice.**

Parmi les produits chimiques qui ont été utilisés dans des expériences de laboratoire pour améliorer le potentielle de l'interface fibre/matrice, il y a l'hydroxyde de sodium, le peroxyde, des acides organiques et inorganiques, le Silane, les anhydrides et les monomères acryliques [59-63]. La méthode de couplage chimique est efficace dans l'amélioration de l'adhérence inter-faciale. La surface de la fibre est traitée avec un composé qui forme un pont de liaisons chimiques entre les fibres et la matrice.

D'une manière générale, l'utilisation des fibres comme renfort de matériaux composites se justifie par :

- La valorisation des ressources locales dans des pays peu industrialisés car ces composites à fibres naturelles ouvrent de nouveaux débouchés aux produits agricoles ;
- Le développement des matériaux et des technologies qui prennent en compte l'impact environnemental. Les fibres naturelles étant des matériaux de qualité qui se produisent et se recyclent naturellement depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture).

Cependant, le manque de la bonne adhésion avec les matrices polymères est une difficulté qui peut empêcher un large usage de la fibre naturelle dans les composites. Le caractère hydrophobe de la majorité des polymères et le caractère hydrophile des fibres naturelles affectent négativement l'adhésion. Pour minimiser ces problèmes, les fibres et/ou les polymères sont sujets à des traitements de modification de leur surface, afin de favoriser l'adhésion.

La contribution des fibres aux propriétés finales du composite dépend:

- des propriétés mécaniques des fibres;
- du type (continu / discontinu) et l'orientation des fibres dans le composite (anisotropie).

### **III.4. Résistance et rigidité des matériaux composites**

La résistance et le module d'élasticité en tension dans le sens longitudinal d'un matériau composite sont les caractéristiques les plus importantes pour lesquelles la fibre du composite est choisie-La rigidité des matériaux composites dépend principalement des éléments suivants :

- Résistance de la fibre,
- Module d'élasticité de la fibre,
- Epaisseur du composite,
- Ratio fibre/matrice.

La rigidité du composite est une caractéristique importante pour l'efficacité du confinement de colonnes de béton.

Lors du chargement d'une colonne de béton confiné ou non confiné, la déformation axiale est plus importante que la déformation radiale. L'enveloppe en composite d'une colonne de béton est sollicitée radialement et en tension. La rigidité de l'enveloppe et sa déformation relative est donc des paramètres à considérer lors du confinement. [51].

### **III.5. Polymères renforcés de Fibres (PRF)**

Un PRF consiste en deux ou plusieurs matériaux distincts combinés à l'échelle macroscopique afin de produire un produit possédant des caractéristiques qui dépassent celles de leurs composantes seules. Un PRF est une combinaison de fibres à haute résistance (les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisées) dans une matrice (polyester, polyétherépoxy ou autre). Le matériau ainsi obtenu est hétérogène et anisotrope. Les fibres donnent la résistance mécanique alors que la matrice unit les fibres, les protège et transfère les charges aux fibres par cisaillement.

Les plaques de polymères renforcés de Fibres (PRF) sont des lamines (ou stratifiées) constituées d'un certain nombre de couches appelées plis. Un pli est une couche de fibres ou de fibres tissées, imprégnées dans une matrice. Lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres dans une combinaison d'orientation définie à partir des propriétés mécaniques désirées, le produit s'appelle alors laminé. Les fibres peuvent être disposées de différentes façons dans un pli. On distingue le pli à fibres unidirectionnelles (aussi appelé nappe unidirectionnelle), le pli à fibres tissées (appelé tissu) et le pli mat (fibres disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle).

La plus importante caractéristique des PRF est leur rapport résistance/masse élevé. On peut facilement produire un PRF dont la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier, et cela pour une masse correspondant à moins de 10 % de celle de l'acier. Les PRF ont une grande rigidité (certaines fibres de carbone à haut module ont un module d'élasticité d'environ deux fois celui de l'acier), généralement une bonne résistance à la fatigue (excepté pour les fibres de verre), une excellente résistance à la corrosion et un poids très léger. Ils sont aussi reconnus pour leur neutralité électromagnétique.

Malgré que le poids des PRF soit quatre à cinq fois inférieur à celui de l'acier, leur coût demeure relativement élevé. Par contre, l'utilisation croissante de ces nouveaux matériaux et le développement de la technologie fait que les prix ont tendance à diminuer graduellement. [56].

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir [64-65]:

- Le polyamide 6.6 (PA6.6), qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA6.6 résiste mal aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton. L'adhérence fibre-béton est généralement faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice, ce qui limite la reprise des efforts par les fibres à l'interface fibre-matrice après la fissuration de la matrice.

Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC,PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton [64-66].

De ce fait, de récentes études menées sur des bétons renforcés par ce type de fibres ont montrés que ce matériau composite présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verre [64].

Le Tableau III.4 résume les caractéristiques mécaniques des fibres de polymère

*Tableau III.4 : Propriétés mécaniques des fibres de polymère [15].*

Type de polymère	Référence	Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte à la traction (MPa)
PA6.6	Rhone-poulene A 218	3	90
PVC	PVC rigide de Solvay	2.5	50
PP	RY6100 de Shell	5	40

### III.6. Utilisation des Fibres dans la Construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le tableau I.5 résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires.

L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus



utilisées dans les dalles et la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre [67].

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés.

*Tableau III.5 : Application les PRF dans les travaux de [68,69].*

<b>Type de fibre</b>	<b>Application</b>
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en Voile Mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquage et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous marin, travaux de restauration bâtiments
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs.
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, plancher d'échafaudage.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration
Végétale	Dalles, tuiles.

## Conclusion

*Le présent chapitre qui porte sur «les généralités des matériaux composites » nous a permis de conclure que le comportement des matériaux composites est assez compliqué et difficile à cerner parce qu'il dépend de plusieurs facteurs dépendant eux mêmes de plusieurs variables tels que, les propriétés des fibres qui dépendent de la nature des fibres, les propriétés de la matrice et le comportement de la bande d'interface*

*La nature des fibres utilisées dans les matériaux composites est en relation avec leurs applications et les modes de mise en œuvre. Le choix des fibres dépend du rôle que l'on désire faire jouer.*

*Les composites polymères renforcés de fibres ont un grand potentiel pour être intégrés dans le génie civil : longue durée de vie, légèreté et facile à construire, bon rapport résistance /poids, fonctionnent dans des conditions agressives pour d'autres matériaux et enfin une résistance élevée à la fatigue et à la corrosion.*

## ***Chapitre IV : Réparation du béton exposé à une température de 600°C par matériaux composites***

---

### ***Introduction***

*La question de l'utilisation rationnelle de l'énergie s'est imposée ces dernières années, pour faire face à l'accroissement de son coût et aux conséquences catastrophiques sur l'environnement. Tous les secteurs sont concernés et doivent être impliqués. Les installations de chauffage ou de climatisation dévorent d'importantes quantités d'énergie pour assurer des conditions de confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Le calcul des besoins énergétiques dépend fortement des propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment, qui sont souvent supposées constantes. Les parois sont constituées de matériaux de construction, qui sont généralement, des milieux poreux capables d'absorber, de contenir et d'échanger de l'humidité, en plus de la chaleur. Une interaction se développe entre le transfert de chaleur et d'humidité et les différentes propriétés de transport. L'absence de données détaillées sur les propriétés thermo-physiques, peut impliquer des anomalies d'exploitation.*

*De nombreux travaux ([70 et 71], montrent que les caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction sont liées aux conditions d'utilisation, notamment, à la température et à la teneur en eau.*

*Depuis plusieurs années, la réfection et le renforcement d'ouvrages en béton armé prennent de plus en plus d'importance dans la construction. Plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des aciers d'armatures, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui impose de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution des normes des accidents (choc contre un élément de structure), l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc.*

*Au milieu du siècle passé, l'évolution dans le domaine des adhésifs a permis de mettre en place une nouvelle méthode de renforcement des structures par collage externe. Dans le milieu des années soixante, on a commencés a appliqués des lames d'acier sur des structures*

*en béton. Ces dernières sont collées à la surface du béton à l'aide d'une résine époxy. Cette méthode constitue une avancée majeure dans le domaine de la réparation, car elle simplifie grandement, le travail par rapport aux méthodes traditionnelles. Toutefois, des problèmes de corrosion d'acier mettent en péril la sécurité de ce type de renforcement [72]. Afin de remédier à ce phénomène de corrosion, l'utilisation des matériaux non métalliques est avérée efficace, ce fut l'apparition des matériaux composites en particulier, les FRP (fibre renforcé polymère). Ces matériaux ont été adoptés dans le domaine de la construction vers les années soixante dix, au Japon, au USA et en Europe [73-74].*

*Les matériaux composites ont de nombreuses qualités: un poids propre très faible, une résistance à la traction élevée, une souplesse leur permettant de prendre n'importe quelle forme, aucune corrosion, une bonne durabilité et une faible épaisseur.*

*Actuellement, on recense de nombreuses recherches menées sur l'utilisation des FRP pour le renforcement de colonnes par confinement et pour le renforcement en flexion de poutres et de dalles [75-79]*

*Dans ce travail, des mesures sont effectuées sur des bétons particuliers, produits localement. Les corrélations des différentes propriétés thermiques sont établies et appliquées sur des exemples de calcul ; cette partie de recherche est une contribution aux travaux réalisés sur le comportement du béton au feu et le confinement des structures en béton. L'objectif principal est l'étude d'un béton exposé au feu et renforcé par des matériaux composites ; une investigation expérimentale sur le comportement des éprouvettes cylindriques a été effectuée sous un chargement axial de compression ; le béton est confectionné par un ciment de classe CEM II/B 32.5N, et il est initialement exposé à une température de 600°C jusqu'à la fissuration intense, puis réparés par le collage d'un tissu composite en fibre de carbone PRFV et de verre PRFC.*

*Le protocole expérimental commence par une présentation des caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que leurs notations. Finalement, un résumé des résultats et leurs discussions est établi.*

## **IV.1. Démarche expérimentale**

Dans cette étude expérimentale, des spécimens cylindriques de béton de 200 mm de longueur et de diamètre de 100 mm ont été confectionnés. Cette étude de réparation des éléments en béton endommagés par le feu est caractérisée par une variation du temps d'exposition à la même température de 600 C°.

Dans cette partie, la formulation de béton est établie pour une résistance de 25 MPa. Chaque lot de 3 spécimens sont exposés à la température d'essai de 600 C°, pendant un temps d'exposition défini ; soit 30 min, 60 min, 90 min et 120 minutes jusqu'à l'éclatement.

Au total, vingt et un (21) Spécimens cylindriques ont donc été fabriqués. Ces éprouvettes sont réparties de la manière suivante :

- Ø Trois spécimens de béton nommé de "référence" ont été testés, sous un chargement axial de compression. Ces spécimens ne sont ni pré-endommagés, ni réparés.
- Ø Douze spécimens de béton destinés à l'endommagement thermique. Cette partie contient :
  - Trois spécimens soumis à une température de 600 C°, pendant 30 min
  - Trois spécimens soumis à une température de 600 C°, pendant 60 min
  - Trois spécimens soumis à une température de 600 C°, pendant 90 min
  - Trois spécimens soumis à une température de 600 C°, pendant 120 min
- Ø Six spécimens de béton ont été pré-endommagés pendant 90 min et réparés par le collage de tissu en matériaux composite (fibre de carbone et de verre).
  - Trois spécimens pendant 90 min réparés par fibre de carbone.
  - Trois spécimens pendant 90 min réparés par fibre de verre.

## **IV.2. Matériaux utilisés**

### **IV.2.1. Ciment**

Le ciment utilisé est un CEM II 42.5 (cimenterie de ZAHANA) de résistance réelle 45 bars, selon la norme NFP 15 301,

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ce dernier sont représentées comme suit :

**Tableau IV.1** : composition chimique et minéralogique du ciment, en %

Composition chimique											Composition minéralogique			
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	RI	SO <sub>3</sub>	PAF	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO <sub>I</sub>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
51.43	22.27	5.76	4.36	2.03	6.49	2.64	2.04	0.35	0.76	1.87	53	27	6	14

**Tableau IV.2** : caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

CN (%)	Délais de prise (min)		Ms (g/cm <sup>3</sup> )	SSB (cm <sup>2</sup> /g)	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
	Dp	Fp			2j	7j	28j	2j	7j	28j
25	155	212	3.10	3510	17.18	30.18	45	4	6.08	7.34
					2j	7j	28j	2j	7j	28j

### IV.2.2. Granulats

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes limités à une seule composition en granulats, comportant un sable fin provenant d'Oued HACHEM (MASCARA) et deux types de gravier (3/8) et (8/15).



**Figure IV.1** : Les granulats utilisés

Tableau suivant représente les différentes caractéristiques des granulats

Tableau IV.3 : Présentation des caractéristiques physiques des granulats

	Sable fin	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue	2.62	2.50	2.63 g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique apparente (NF P 18-554)	1.45	1.40	1.40 g/m <sup>3</sup>
Teneur en eau (NF P18-554)	4.7	1.5	0 %
Coefficient d'aplatissement (NF P-18-561)	-	20	15.7 %
ESP (NF EN 933-8)	95%	-	-
ESV (NF EN 933-8)	85 %	-	-
Micro deval (NF P 18-6572)	-	20	22 %
Los angelos (NF P 186573)	-	20	LA = 20 %.

Dans notre travail, le sable utilisé provient d'Oued HACHEM (MASCARA) et les graviers de classe 3/8 et 8/15 de la carrière de TIZI (MASCARA), sont des graviers concassés de haute qualité d'origine silico-calcaire.

L'analyse granulométrique est un procédé de détermination par tamisage du pourcentage de chaque fraction granulaire ou diamètre pour un matériau granulaire donné. Dans la formulation du béton, on a besoin d'optimiser le squelette granulaire. A cet effet, à l'aide des méthodes granulaires (DREUX-GORISSE) [80] et les courbes granulométriques, l'opérateur peut déterminer le squelette granulaire optimum. Ce dernier, peut être défini comme étant un ensemble de grains, où chaque proportion ou fraction a un volume tel qu'elle occupe le vide laissé par les deux fractions intermédiaires ; ce qui fait augmenter la compacité et la résistance de l'empilement granulaire d'une part ; et d'assurer une bonne ouvrabilité au mélange, i.e. pour le béton, d'autre part.

De ce fait, l'optimisation granulaire confère au mélange une compacité et ouvrabilité à l'état frais, et une résistance à la compression et à la traction à l'état durci.

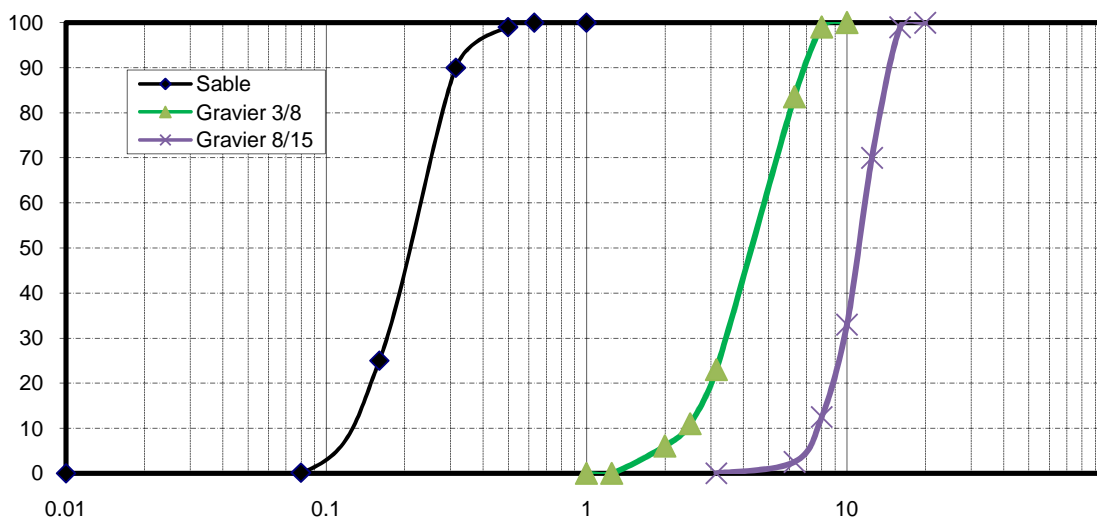


Figure IV.2 : Courbe granulométrique des différents granulats

### IV.2.3. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est nommé « *SUPERIOR RM34S12* » issue de l'entreprise **TEKNACHEM ALGERIE**, est un super plastifiant, haut réducteur d'eau destiné pour la confection de bétons de haute qualité. Il est conçu à base de poly carboxylates modifiés et compatible avec tous les types de ciments. **SUPERIOR RM34S12**, présente un léger effet retardateur, quand le dosage est supérieur à 1,5%.



Figure IV.3: Adjuvant «*SUPERIOR RM34S12*»

### IV.2.4. Matériau composite

Deux type de matériaux composites on a utilisé dans ce travail, le premier est composé d'un tissu en fibres de carbone SIKA WRAP HEX 230C, et se présente sous forme de rouleau de 3,5m de longueur et 0,3m de largeur avec une épaisseur de 1mm ; provenant de l'entreprise SIKA ELJAZAIR, le deuxième est un tissu en fibres de verre fibre de verre continues type E d'une épaisseur de 0.25 mm et d'un poids spécifique de 300 g/m<sup>2</sup>.

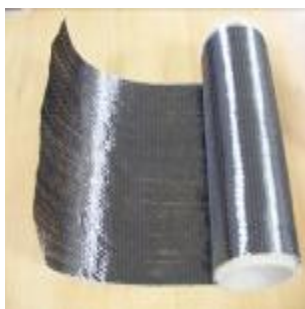
La résine utilisée pour le collage des matériaux composites (fibres de verres et fibres de carbones) sur le support béton est appelée résine SIKA DUR 330, est une colle structurale thixotrope à deux composants, à base de résine époxydique, peu sensible à l'humidité, utilisable dans une plage de températures comprises entre +10°C et +30°C.

Les propriétés mécaniques des deux tissus composites en fibres utilisés et la résine sont données dans le tableau suivant:

Tableau IV.4 : Propriétés mécaniques des composites et la résine [81-83]

	FRPG	FRPC	Résine
Résistance à la traction (MPa)	69-86	345-690	> 30 à deux jours, à 20°C°
Module d'élasticité en traction (GPa)	74	> 165	4.5 à sept jours, à 23 C°
Allongement a la rupture en traction (%)	4,5	1.7	/
Résistance à la compression (MPa)	/	/	> 55 à deux jours, à 20°C





Tissu de fibres de carbone



Tissu de fibres de verre



La résine

**Figure IV.4 : Matériau composite**

### IV.3. Fabrication des spécimens cylindriques de béton

Pour minimiser la dispersion des résultats, l'ensemble des spécimens (21 spécimens) ont suivi le même Protocole de fabrication, à savoir le malaxage, le coulage la vibration et la cure. Tous les bétons ayant servi à ses essais ont été fabriqué localement dans le laboratoire de génie civil.

#### IV.3.1. Formulation de la composition de béton

La formulation des trois compositions de béton ont été déterminés d'après la méthode « DREUX GORISSE » [80] basée sur l'analyse granulométrique du sable et des différentes fractions de gravier.

D'après le calcul, les compositions finales de bétons obtenus possédant une classe de résistance : 25MPa, sont données dans le tableau suivant :

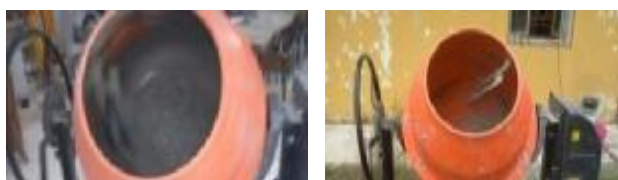
**Tableau IV.5 : Composition de béton**

Composant	Poids (kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	350
Sable	686
Eau	175
Gravier 8/15	140
Gravier 15/25	934
Adjuvant	5.25
Masse volumique ( $\gamma_b$ )	2200

#### IV.3.2. Malaxage et mise en œuvre

Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur (bétonnière) à axe horizontal, constitué de cuve de vitesse de 30 tr/min et de palettes fixées (02), sa capacité est 145 litres (figure IV.5). Ce type de malaxage est très efficace et fournit dans la plupart des cas un béton très homogène.

Après le malaxage le mélange ainsi obtenue est directement mise dans les différents moules.



**Figure IV.5:** Malaxeur (bétonnière) à axe horizontal

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à même température, dans un bac d'eau (Figure III.6.) de façon que toutes leurs surfaces soient constamment recouvertes d'une mince pellicule d'eau pour cure pendant 28j jusqu'à le jour d'essai.



**Figure IV.6 :** Cure des éprouvettes pendant 28j

Après durcissement pendant 28j (**Figure.14**), l'ensemble des spécimens cylindriques de béton de référence ont systématiquement soumis à un surfacage manuel des deux faces.



**Figure IV.7 :** Spécimens cylindriques après un durcissement de 28j.

#### **IV.4. Endommagement des spécimens**

Le four utilisé «**linn High Therm**» de température maximale **850°C** réglable par pas. Sachant que le pas maximal est de 199 °C c'est à dire pour obtenir certains température on va régler le pas pour atteindre la température désirable



Figure IV.8: Four utilisé «linn High Therm» de température maximale 850°C

- Les spécimens sont mis dans le four à température fixée 600°C pendant 30 min, 60 min, 90 min et 120 minutes jusqu'à l'éclatement.



a) L'entrée de four



b) la sortie de four

Figure IV.9: Spécimens a l'entrée et sortie de four

- les spécimens sont pesés avant et après la sortie de four (l'endommagement thermique) pour confirmer la perte de masse de béton.
- La vitesse de son est mesurée avant et après l'endommagement thermique pour confirmer la dégradation de béton

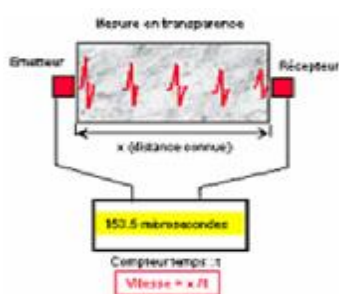


Figure IV.10: Essai ultrasonique

#### IV.5. Procèdes de réparation des spécimens fissurés

Cette étape consiste à réparer les spécimens endommagés par l'effet de la température (600°C) pendant 90 min, il est utile de rappeler que les six éprouvettes ont été regroupées de la manière suivante :

- Ø Trois éprouvettes de béton ont été réparées par le collage de tissu en matériaux composite (fibre de carbone).
- Ø Trois éprouvettes de béton du troisième groupe, ont été réparées par le collage de tissu en matériaux composite (fibre de verre).



*a) avant l'endommagement b) après l'endommagement*

**Figure IV.11:** *Spécimens avant et après l'endommagement par T°C à 90 min*

✓ Le chemisage est réalisé selon les étapes suivant :

#### **IV.5.1. Préparation du support béton**

- La préparation du support béton a pour objectif d'éliminer toute trace superficielle, de graisse de laitance et de toute partie hétérogène.
- La surface des éprouvettes est nettoyée par polissage à l'aide d'une brosse métallique puis dépoussiérée à l'aide d'un pinceau ensuite nettoyée par un diluant. (**Figure 18.**)



*a) Brossage*

*b) dépoussiérage*

*c) Nettoyage par diluant*

**Figure IV.12:** *Préparation du support d'épreuve*

### **IV.5.2. Préparation du tissu composite**

Le tissu est découpé soigneusement aux dimensions souhaitées ; en veillant à ne pas endommager l'extrémité découpée. Une fois découpé, le tissu doit rester soit à plat, soit enroulé. En aucun cas, il ne doit être plié afin de ne pas endommager les fibres.



Découpage de tissu de fibre de verre    Découpage de tissu de fibre de carbone

**Figure IV.13: Préparation des tissus composites**

### **IV.5.3. Préparation de la colle : la résine (SIKA DUR 330)**

- Homogénéiser chaque composant séparément dans son emballage.
- Verser la totalité du composant B dans le composant A.
- Mélanger avec un agitateur électrique muni d'une hélice pendant environ 3 minutes jusqu'à obtenir un mélange uniforme de couleur grise.
- Reporter l'ensemble du mélange dans un récipient propre, puis mélanger à nouveau pendant environ une minute, à faible vitesse afin de limiter l'entraînement d'air dans la résine.
- La durée de vie débute dès le mélange des deux composants B et A. Elle est plus longue à basse température.

Donc La résine est préparée par versement de la totalité du composant B dans le composant A après l'homogénéisation de chaque composant séparément dans son emballage, nous avons mélangé manuellement dans un récipient propre pendant 3 minutes jusqu'à une obtention d'un mélange uniforme de couleur grise.



a) Résine (SIKA DUR 330)



b) Ouverture de la résine



c) Malaxage de la résine

**Figure IV.14: Préparation de la résine (SIKA DUR 330)**

#### **IV.5.4. Application du renfort**

Pour le collage du renfort composite sur le support béton (éprouvette de béton), on a procédé aux étapes suivantes :

-Appliquer une couche de 1 à 3 mm de la colle sur la surface de l'éprouvette et la répartir à l'aide d'un rouleau.



Positionnement de tissu de fibre de carbone



Positionnement de tissu de fibre de verre



Spécimens réparés par tissu de fibre de carbone



Spécimens réparés par tissu de fibre de verre

**Figure IV.15:** Application du renfort

#### **IV.6. Résultats et discussions**

- Nous allons adopter dans tout ce qui suit les conventions suivantes :
  - Ø **BT** : Béton témoins.
  - Ø **B30** : Béton exposé à une température de 600°C pendant 30 minutes.
  - Ø **B60** : Béton exposé à une température de 600°C pendant 60 minutes.
  - Ø **B90** : Béton exposé à une température de 600°C pendant 90 minutes.
  - Ø **B120** : Béton exposé à une température de 600°C pendant 120 minutes.
  - Ø **BRFC** : Béton renforcé par fibre de carbone
  - Ø **BRFV** : Béton renforcé par fibre de verre
  - Ø dans notre travail, nous avons abordé le procédé de réparation des bétons exposés à une température de 600 C° ; cette température a été choisie à partir de notre recherche bibliographique qui nous a confirmé que l'endommagement du béton commence à partir

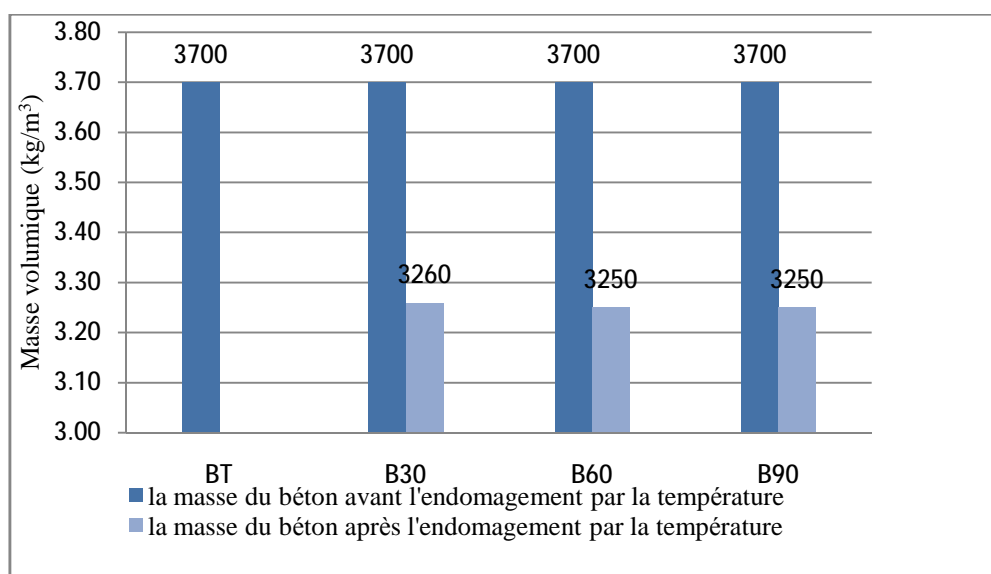
de 400 à 600 C°, un intervalle de température qui a été confirmé lors des tests d'incendie. D'autre part nous avons varié le temps d'exposition des éprouvettes à cette température d'un pas de 30 minutes pour suivre l'évolution de l'endommagement.

#### **IV.6.1. Résultats de la perte de masse**

Les spécimens sont pesés avant et après la sortie de four (l'endommagement thermique) pour confirmer la perte de masse de béton, les résultats de la perte de masse volumique sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

*Tableau IV.6 : Influence de la température sur la perte masse.*

Spécimens Cylindrique	La masse de béton avant l'endommagement (kg/m <sup>3</sup> )	La masse de béton après l'endommagement (kg/m <sup>3</sup> )
BT	3700	/
B30	3700	3260
B60	3700	3250
B90	3700	3250
B120	3700	éclatement



*Figure IV.16: Variation de la perte de masse de béton exposé à température de 600 °C en fonction de temps*

#### **IV.6.2. Résultats de l'essai ultrasonique**

L'essai ultrasonique utilisé pour confirmer l'endommagement thermique du béton après la sortie de four et après refroidissement à l'air libre. Cet essai est consisté de mesurer la vitesse du son avant et après l'endommagement à travers les spécimens cylindriques. Les différents résultats obtenus sont représentés dans le tableau Suivant :

Tableau IV.7 : Résultats de vitesse du son avant et après l'endommagement des spécimens cylindriques

Spécimens Cylindrique	Vitesse du son avant l'endommagement (m/s)	Appréciation de la qualité du béton	Vitesse du son après l'endommagement (m/s)	Appréciation de la qualité du béton
BT	4601	Excellent	/	/
B30	4601	Excellent	3452	Bon
B60	4601	Excellent	987	Très mauvais
B90	4601	Excellent	783	Très mauvais
B120	4601	Excellent	éclatement	éclatement

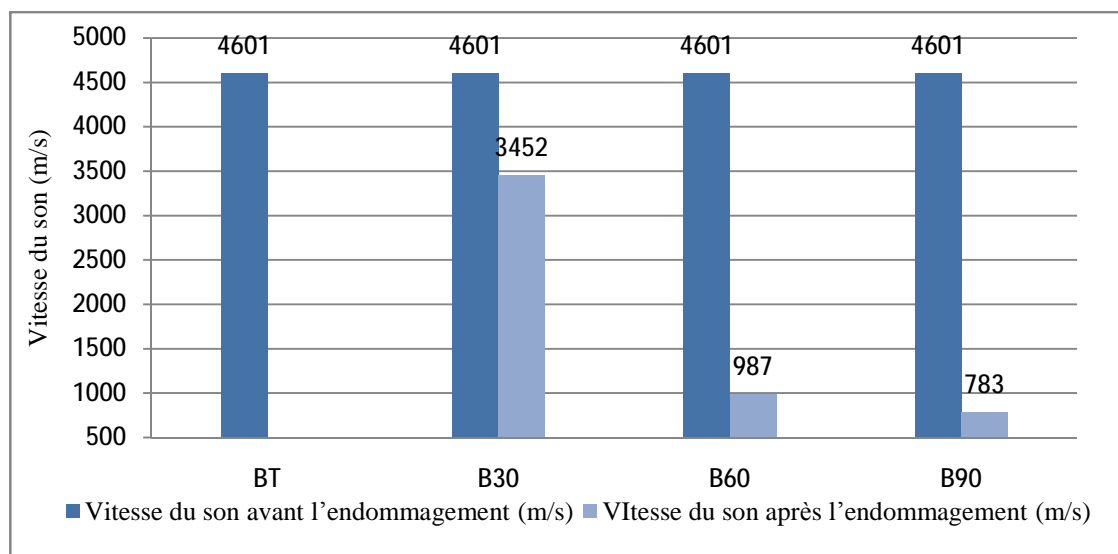


Figure IV.17 : Variation de la vitesse de son exposé à Température de 600 °C en fonction de temps

- **Analyse et discussion des résultats**

Pour toutes les spécimens cylindriques de dimensions 100x200 mm endommagés nous avons remarqué une chute de vitesse du son après l'endommagement (chute de résistance) ce qui signifie la dégradation du béton lors de son exposition à de température élevée. Concernant la perte de masse, nous pouvons noter que, la vitesse de perte de masse augmente progressivement jusqu'à ce qu'elle se stabilise (30, 60, 90 minutes). Ce qui confirme la recherche de Kanema et al 2007 [84] et Zhang en 2011 [85].

### IV.6.3. Résultats de l'essai de compression

Les cylindres de notre béton sont soumis à une charge de compression uni-axiale jusqu'à la rupture. La machine utilisée en question est une presse hydraulique avec une étendue de 1500 KN. Cette presse comporte deux plateaux, un plateau inférieur mobile et l'autre supérieur fixe est une rotule de type Autotest. Un taux de chargement quasi-statique est appliqué avec une



vitesse de 0.5 kn/s. A mi-hauteur au milieu de deux faces opposées, ont été mesurées, à intervalles rapprochés et les forces et les déformations axiales et radiales. La *Figure IV.18* montre un échantillon soumis à un effort de compression.

Le raccourcissement à la compression (déformation longitudinale) est mesuré par un capteur de déplacement disposé verticalement entre les deux plateaux de la presse.



*Figure IV.18 : Essai de compression*

Les résultats expérimentaux obtenus sont organisés en trois sections :

La première section portera sur les résultats des essais de compression sur les éprouvettes qui ne subissent aucune opération de pré fissuration ou réparation (béton de référence) et cela dans le but de voir la résistance obtenue après la formulation des compositions de béton.

Dans la deuxième section, les essais d'écrasement ont été exécutés sur les spécimens endommagés à température 600°C pendant 30min, 60min et 90min ainsi que sur les spécimens destinés à la réparation. Ensuite, les résultats d'investigation par l'essai d'ultrason et la perte de masse sont effectués afin d'évaluer l'état d'endommagement des spécimens et leur modes de ruptures.

Dans la troisième section, les résultats d'écrasement en compression jusqu'à la résistance ultime sur les éprouvettes réparées par les deux matériaux composites seront présentés suivie par leur comportement. Cette section comprendra une comparaison entre les résultats expérimentaux de ces deux types de tissu de réparation avec fibre de verre PRFG et de carbone PRFC et les modes de ruptures observés.

#### **a. Béton témoin (non réparé)**

Dans cette section, on présente les résultats des essais de compression des spécimens du 1<sup>er</sup> groupe de béton de référence et qui ne sont ni pré-endommagées, ni réparées. La figure (VI.19) présente la loi de comportement contrainte axiale-déformation longitudinale afin d'évaluer les gains de résistance et de déformabilité.

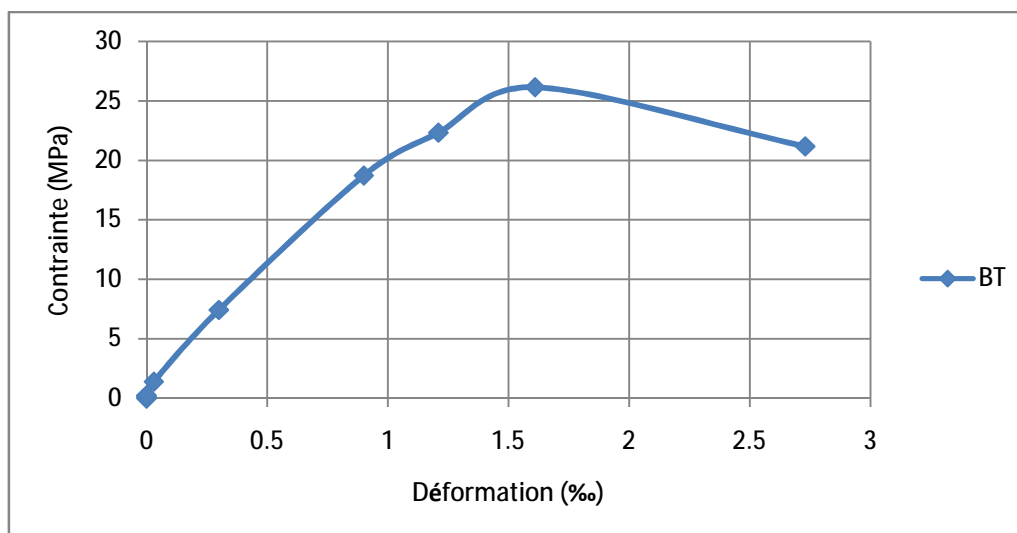


Figure IV.19 : Courbe moyenne contrainte – déformation de béton de référence

### b. Béton endommagé à une température de 600°C

Dans cette section on présente les résultats des essais de compression de 2<sup>ème</sup> groupes des spécimens endommagés à une température de 600°C pendant 30, 60, 90 et 120 minutes. La figure suivante présente les différentes courbes contrainte-déformation du béton témoin et bétons endommagés par la température (30 minutes, 60 minutes et 90 minutes)

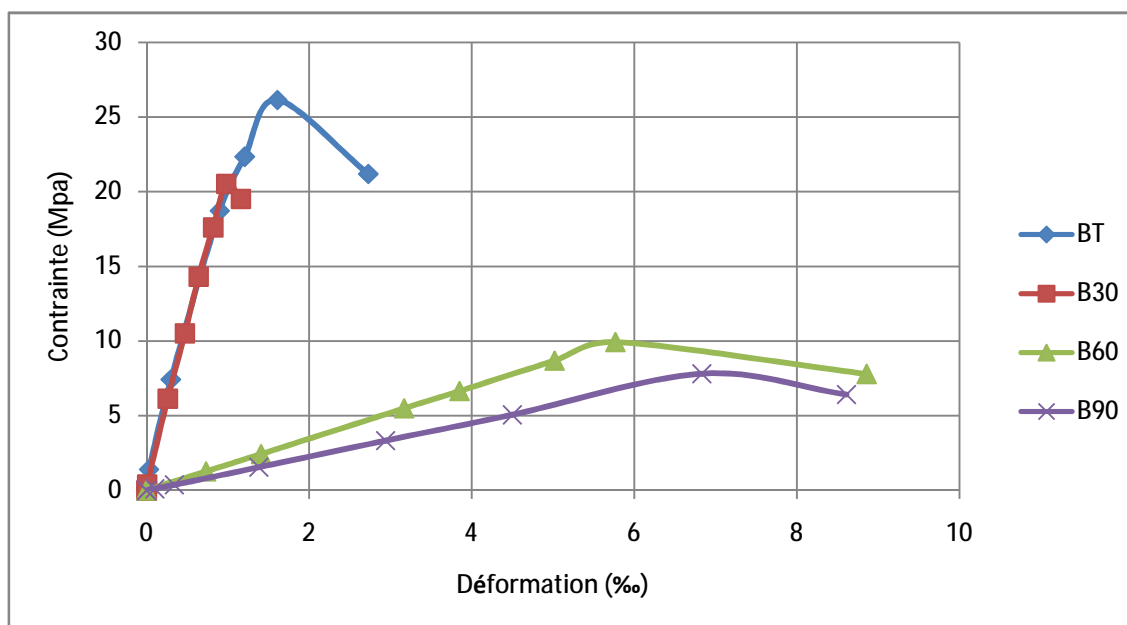


Figure IV.20 : Courbes moyennes contrainte – déformation de différents type de béton endommagé par la température 600 C°

**Remarque :** Les éprouvettes exposées à 600 C° pendant 120 minutes ont été entièrement détérioré ce qui a préconisé leurs retraits de notre illustrations et résultats (Figure IV.21).



Figure IV.21 : éclatement des spécimens exposés à 600 °C pendant 120 minutes.

▼ Variation de la résistance à la compression en fonction du temps d'exposition à la température

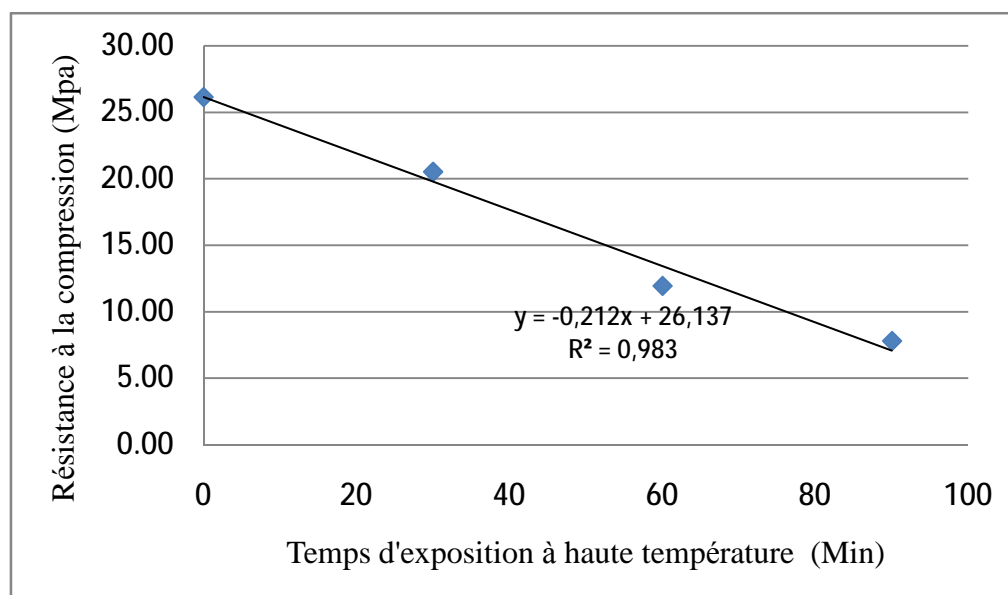


Figure IV.22 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du temps d'exposition à une température de 600 °C

• Analyse et discussion des résultats

D'après la récolte des résultats de l'exposition du béton témoin à haute température pendant un intervalle de temps variable, nous avons pu remarquer une détérioration de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation du temps d'exposition à une température de 600 °C. Cette détérioration suit une évolution presque linéaire ( $R^2 = 0,983$ ) dont la droite de corrélation s'écrit sous la forme :  $f_{c28} = -0.212 \times T + 26.137$

L'équation de cette droite confirme les résultats non cités de l'exposition à 2 heures où les éprouvettes du béton témoin ont été entièrement endommagées par la température c'est-à-dire une résistance à la compression avoisinant le Zéro.

**c. Résultat d'écrasement du béton réparé par des matériaux composites**

Pour notre étude de réparation nous avons jugé que le temps d'exposition de 90 minutes était optimal pour la réparation des bétons. Cette réparation a été appliquée par deux matériaux composites, le premier en fibre de verre, le deuxième en fibre de carbone.

Cette partie présente les résultats obtenus des éprouvettes endommagées par une température de 600°C pendant 90 minutes et réparées par le chemisage à l'aide de tissu en fibres de carbone et de verre.

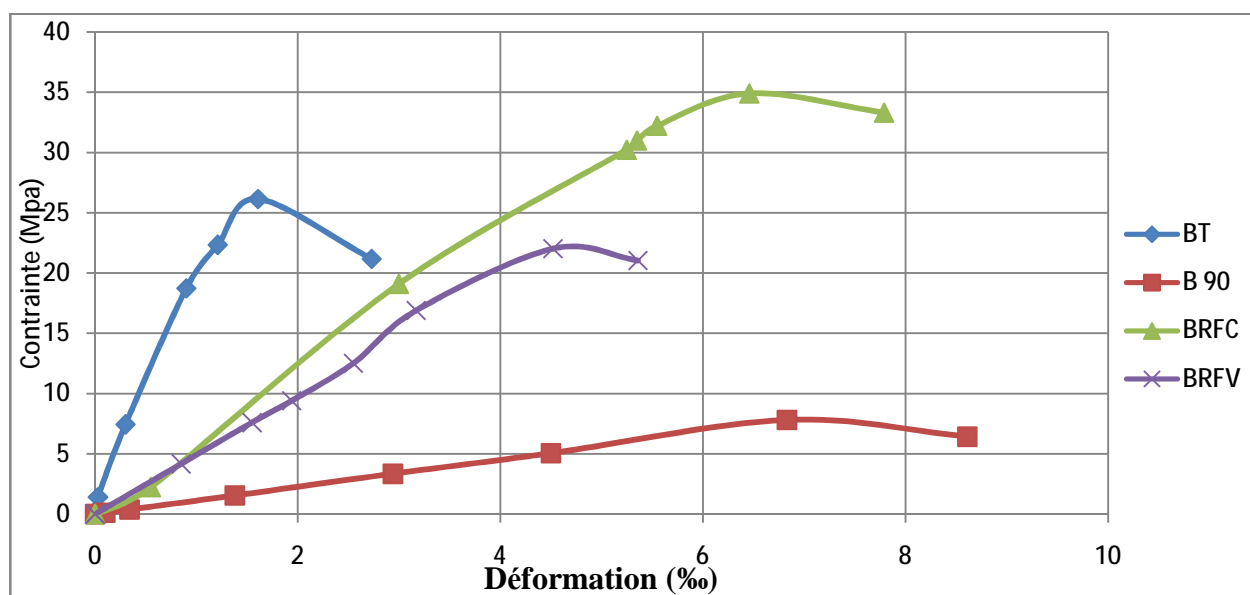


Figure IV.23 : Courbe contrainte - déformation pour les spécimens de béton témoin et béton réparé

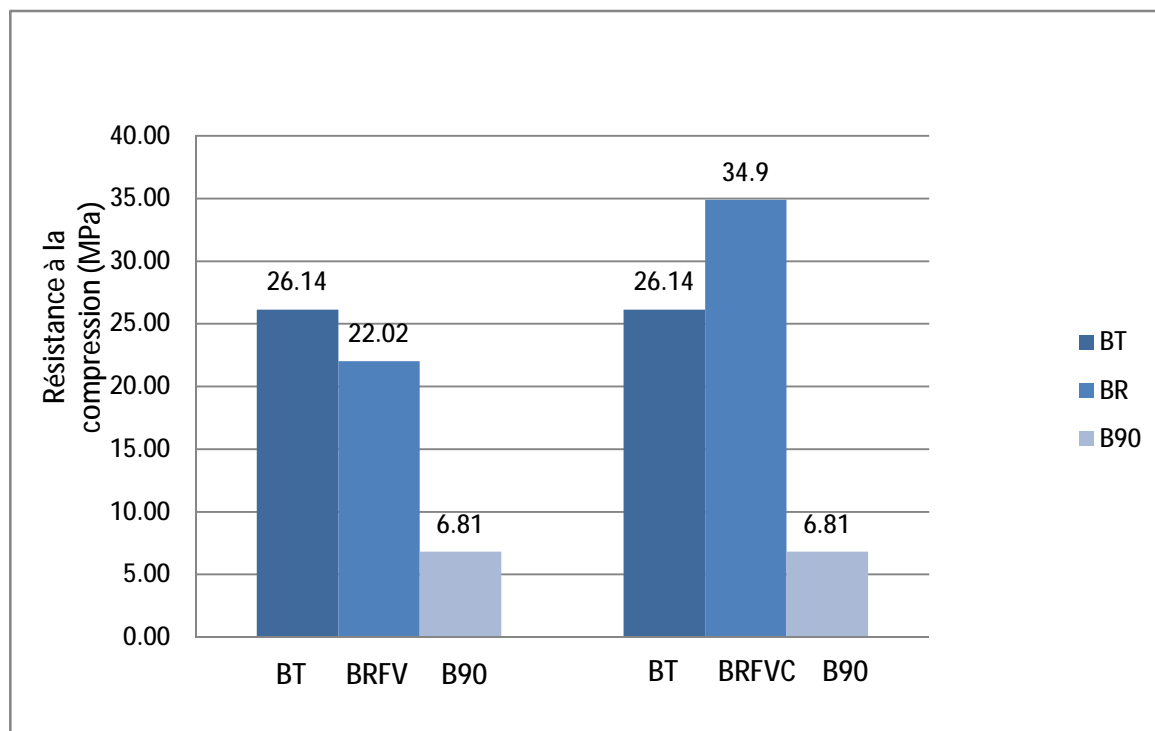


Figure IV.24 : Variation de la résistance moyenne à la compression de béton témoin avec béton réparé.

- **Analyse et discussion des résultats**

Pour le cas d'une réparation par le matériau en fibre de verre, nous avons remarqué une augmentation importante de la résistance à la compression qui avoisine 283 % par rapport à celle du béton endommagé non réparé. Cependant, nous avons remarqué une faible diminution de 19 % de la résistance du béton réparé par fibre de verre par rapport à celle du béton non endommagé. Ce constat nous pousse à dire du point de vue technique que la réparation en fibre de verre est une option non optimale, car elle n'atteint pas totalement la résistance à la compression initiale du béton témoin.

Pour le cas d'une réparation par le matériau en fibre de carbone, nous avons remarqué une augmentation importante de la résistance à la compression et qui dépasse celle du matériau en fibre de verre, qui avoisine 412 % par rapport à celle du béton non réparé. En plus, nous avons remarqué une augmentation de 33 % de la résistance du béton réparé par fibre de carbone par rapport à celle du béton non endommagé. Ce constat nous pousse à dire du point de vue technique que la réparation en fibre de Carbone est une option optimale, car elle dépasse la résistance à la compression initiale du béton témoin.

#### IV.6.4. Module de Young

La figure IV.25, nous montre que le module de Young varie en fonction de l'exposition des éprouvettes à une haute température. En effet, nous avons remarqué, que plus l'éprouvette soit exposé à la haute température, plus le module de Young diminue. Cette diminution est essentiellement due à une détérioration des liaisons chimiques de l'hydratation du ciment. Pour le cas des réparations, nous avons constaté une faible augmentation du module de Young, qui n'atteint pas les valeurs initiales du béton témoin, néanmoins cette insuffisance n'affecte pas la résistance.

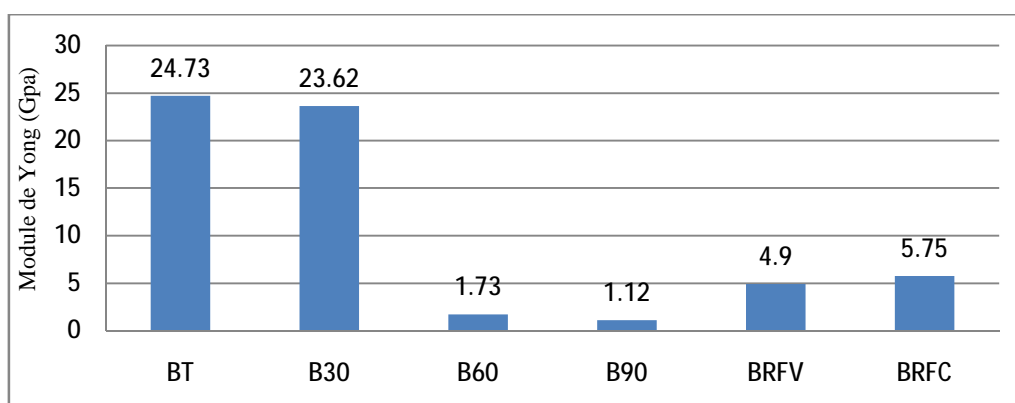


Figure IV.25 : Variation de module de Young E du béton réparé selon le type de réparation

#### IV.6.5. Modes de rupture des spécimens

##### a. Béton réparé par fibre de verre

Les spécimens confinés par le PRFG ont tous subi une rupture du tissu de fibres (verticale) et un glissement au niveau des chevauchements. Pour tous les spécimens, le béton a été arraché dans les zones de rupture, le noyau de béton est pulvérisé. L'initialisation de fissures est depuis le milieu (un gonflement intense ou bien un allongement) et vers le haut de spécimen enveloppé



Figure IV.26 : Mode de rupture des spécimens de béton réparé par fibre de verre

***b. Béton réparé par le PRFC :***

Les spécimens confinés par le PRFC ont tous subi une rupture du tissu de fibres (horizontale et verticale), un glissement et une rupture au niveau des chevauchements. Pour tous les spécimens, le béton a été arraché dans les zones de rupture, le noyau de béton est broyé. L'initialisation de fissures est depuis le milieu. Cela peut s'expliquer par, la fibre de PRFC a atteint des grandes déformations, ce niveau de déformation a créé une rupture dans la zone centrale du spécimen en forme conique. Il s'agissait d'une rupture en cisaillement ou le béton et le tissu ont pratiquement atteint leur capacité maximale.



*Figure IV.27 : Mode de rupture des spécimens de béton réparé par fibre de carbone*

## **Conclusion**

*L'identification expérimentale réalisée sur les différents constituants, du béton, a permis de quantifier leur propriétés intrinsèques, qui seront utilisées pour la confection et la réalisation de la campagne d'essai et l'enveloppe composite à base de fibre de carbone et de verre pour la réparation des éprouvettes endommagées à 600°C pendant 90 minutes.*

*L'application des matériaux composites (fibres de carbone, fibres de verre) sur le béton et une opération très délicate qui nécessite le bon suivi des règles de travail et des normes prescrites afin de minimiser les erreurs et les incertitudes qui nuit à la crédibilité de nos résultats.*

*Ce volet de recherche porte sur l'évaluation du comportement pré-endommagé et réparé par deux tissus fibres de verre et fibre de carbone. Sur la base des résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :*

*Le béton réparé par fibre de verre présente un comportement mécanique différent que celle de béton réparé par fibre de carbone seule qui présente un comportement fragile pour des classes de résistance élevé.*

*La réparation par fibre de carbone permet la récupération de la résistance et de ductilité du béton, et offre un gain important que celle par fibres de verre ; en effet, on observe une grande amélioration de résistance et de ductilité due aux caractéristiques mécaniques de fibre de carbone. Signalons ici, l'effet bénéfique, qui consiste à conserver ou garder au moins la résistance lorsque le béton a été endommagé.*

*De point de vue économique, le chemisage par composite présente un cout élevé, ce qui représente un point négatif. Toutefois, cette méthode présente de nombreux avantages techniques et sécuritaires: légèreté, résistance mécanique, grande ductilité et facilité de réalisation.*



## ***Chapitre V : Efficacité des matériaux cimentaires dans protection du béton confiné par PRF exposé à des températures élevées***

---

### ***Introduction***

*Plusieurs pays industriels fait face un problème énorme c'est que leurs infrastructures se détériorent rapidement, donc elles cherchent à augmenté la durée de vie de leurs ouvrage qui conduit à développé un système de renforcement et de réparation du structure par l'utilisation d'un matériaux plus rigide et plus efficace qui prend le nom de matériaux composite.*

*Les matériaux composites PRF sont connus par leur efficacité de renforcement des structures en béton. Néanmoins, la résistance au feu est une problématique importante car les éléments à renforcer; qu'ils se trouvent à l'intérieur de parkings, d'habitations ou qu'ils soient des éléments de tunnels ou de ponts, doivent garantir un maintien structurel pendant une certaine durée en cas d'incendie. D'autre part, les matériaux de construction doivent limiter au maximum la propagation des flammes et leur combustion ne doit pas générer ni de fumées toxiques ni d'émanations dangereuses. Ces points sont critiques pour des matériaux chimiques tels que les polymères renforcés de fibres PRF.*

*Les polymères renforcés de fibres (PRF) sont des matériaux composites, composés de fibres à haute résistance (généralement carbone, verre ou aramide) noyées dans une matrice de polymère (généralement époxy) pour fournir les propriétés bénéfiques du matériau idéales. La combinaison de ces éléments donne des matériaux à une grande résistance mécanique, module de rigidité élevé et une résistance aux milieux agressifs. Ces matériaux, largement utilisés depuis plusieurs années dans le domaine de l'aéronautique et de l'aérospatiale, se taillent lentement une place en génie civil.*

*Les polymères renforcés de fibres PRF sont très sensibles à l'élévation de température : dès que la température approche celle de transition vitreuse des fibres, de la matrice ou encore*

*de l'adhésif, le composite se détériore: la rupture des liaisons chimiques rend le renforcement totalement inutile.*

*En cas d'incendie, les propriétés de PRF se détériorent rapidement, entraînant une perte rapide de la résistance et la rigidité [86]. Spécifiquement, les températures de transition vitreuse des polymères couramment utilisés varient entre 60 et 82°C [87]. Par conséquent, les PRF perdent leur effet de renforcement et les poutres en béton ou des colonnes perdent leur capacité structurelle [88]. Des recherches approfondies ont été menées dans les deux dernières décennies sur l'utilisation des PRF dans le renforcement des structures en béton armé dans les conditions ambiantes [89-90]. Cependant, il y a des études limitées sur le comportement des éléments en béton renforcé par FRP au feu.*

*Cependant, en raison de la sensibilité relativement élevée de ces matériaux à des températures élevées et au feu, leurs utilisations dans la réparation ou de renforcement rendent ces structures particulièrement vulnérables au feu. Cela à long terme décourage l'application des PRF dans les bâtiments. Lors de la conception de bâtiments, la sécurité-incendie est prise en considération en fournissant des mesures de protection pour empêcher la propagation du feu et l'effondrement structurel du bâtiment afin de permettre l'évacuation des occupants, de l'immeuble. Ces objectifs peuvent être atteints, en partie, en fournissant la résistance au feu adéquat pour les éléments de construction. Par définition, la résistance au feu est la capacité d'un ensemble structurel ou un élément de supporter les effets du feu pour une période de temps sans perte de transmission de la température.*

*A cet effet, L'objectif de ce chapitre s'intéresse à la résolution de ce problème par l'étude de comportement sous un chargement axiale des colonnes en béton renforcées à l'aide des PRF en fibres de verre ou fibres de carbones, protégées par une couche en matériaux cimentaires de mortier ou plâtre. Les colonnes renforcées et protégées ont été testées à différentes températures.*

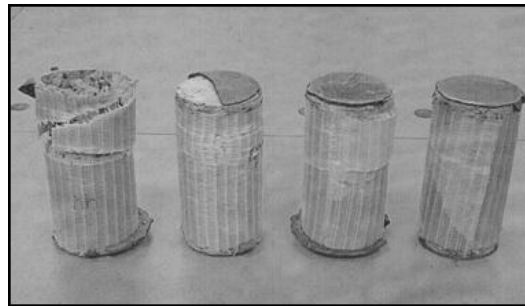
### **V.1. Travaux expérimentaux antérieurs portant sur la tenue au feu des colonnes en bétons renforcées par des PRF**

Plusieurs chercheurs ont démontré que le renforcement des colonnes ou des poutres en béton armé par des fibres de verre ou fibre de carbone, améliore leur résistance au cisaillement et leur ductilité. Ils ont montré expérimentalement et analytiquement l'efficacité du renforcement par ces matériaux en PRF.

Dans ce sens là, on a présenté quelques travaux précédant qui sont présenté ci-dessus :

DOUGLAS, B. et al en 2002. [91] ont appliquée de l'extérieur un composite de renfort qui peut être utilisé pour fournir un dosage supplémentaire ou une ductilité au béton dans le cadre d'une réhabilitation sismique ou réparer une structure, mais le renfort composite peuvent être exposés à des niveaux élevés de températures. Dans cette étude, des cylindres de béton ont été emballés avec un composite, exposés à une gamme de températures élevées et on laisse refroidir.

Après un essai de compression des cylindres refroidis, ils ont indiqué qu'il n'y avait pas de perte statistiquement significative de la force jusqu'à ce que la température de traitement était plus de 300°C supérieure à la température de transition vitreuse de la résine époxy. Cette étude a également examiné le rôle d'une fibre protectrice le revêtement prévenu le début de la transition de modes de défaillance par une température près de 300°C.



**Figure V.1 : Modes de rupture d'un béton renforcé par un FRP à base de fibres de verre et de résine époxy après le cycle thermiques [91].**

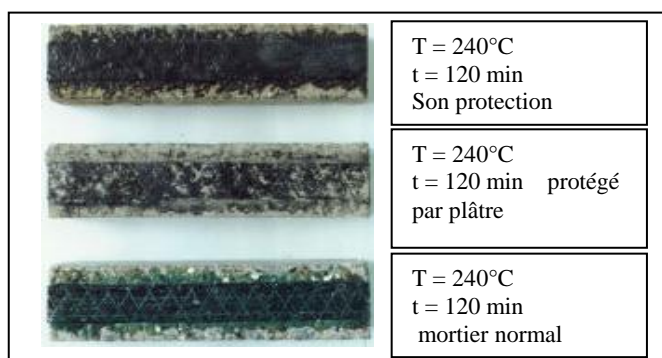
Les essais de compression des cylindres en béton armé à l'extérieur après l'exposition à des températures élevées montrent qu'il existe une température de transition au-dessus de laquelle le chauffage du composite réduit sa résistance. Pour cette étude, la résistance du composite était essentiellement affecté par l'exposition à la chaleur jusqu'à 135 °C.

A des températures plus élevées, il ya eu une baisse constante de la capacité des composites pour renforcer les cylindres de béton, la protection contre l'incendie revêtement testé est efficace pour réduire la dégradation due au chauffage

Il a également été constaté que le mode de rupture du renfort composite système a changé que la température a augmenté l'exposition a des températures plus basses dans l'étude de ruptures par cisaillement, à travers l'épaisseur de la résine époxy Cette diminution de la capacité de Composite pour confiner le béton. L'échec était dû à une rupture définitive comparaison les résultats des tests avec et sans protection contre les incendies à des températures similaires.

Rogério C. A. de Lima et al en 2003 [92], Ont travaillés, sur la dégradation thermique de ces matériaux composites mesurée en termes de la perte de résistance à la flexion des poutres

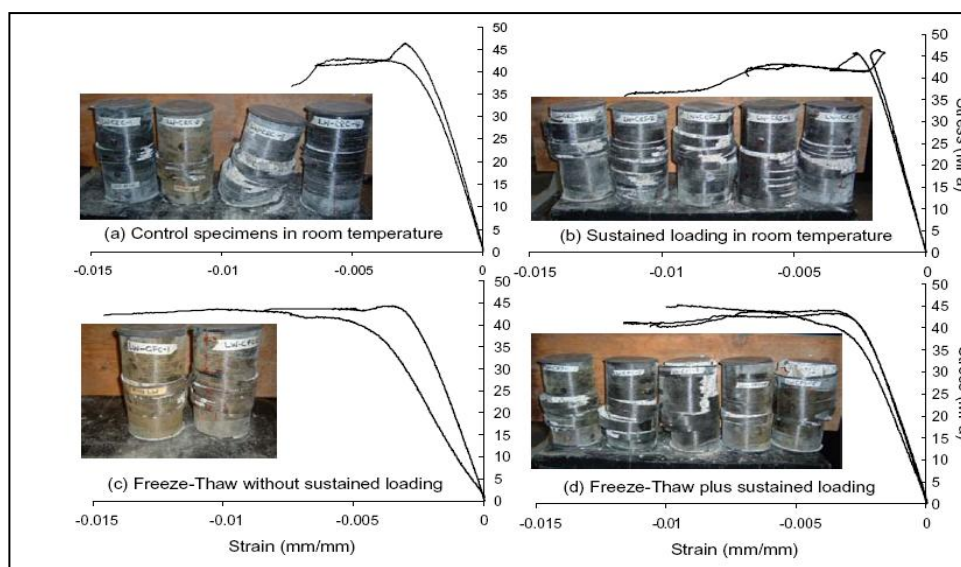
renforcées, est évalué pour des températures variant de 80 ° C à 240 ° C et les temps d'exposition variant de 30 à 120 min. Protections passives avec du mortier de ciment et de plâtre ont également été testés, visant à réduire la dégradation du PRF et la résine époxy. Les spécimens exposés à diverses combinaisons de ces variables ont été testés et les résultats ont montré que l'époxy adhésif présente une tendance croissante à la volatilisation de la température, un phénomène qui peut sérieusement affecter l'efficacité de la technique de réparation. Cependant, l'utilisation de passive protection sous la forme d'incombustible et revêtements thermo-isolants a pu retarder le processus de dégradation. La définition d'une technique adéquate pour appliquer ce genre de renforcement est indispensable pour éviter l'effondrement des éléments structuraux lors d'un incendie. il est important de souligner que, dans les grandes conflagrations, la protection ne sera pas en mesure d'empêcher la chaleur vers l'élément. Il pourrait, au moins, de ralentir la dégradation pendant une période de temps suffisant pour permettre l'évacuation des occupants et le début de la lutte contre les incendies opérations. L'analyse des données obtenues dans cette recherche, il est possible de définir la température seuil pour la dégradation du matériau composite. Les tests effectués préciser que protection est nécessaire si l'on prévoit le renforcement pour répondre aux demandes posées par les normes liée à la résistance au feu. La protection passive a montré des résultats prometteurs, même si mortiers traditionnels sont utilisé.



**Figure V.2 :** *Spécimens avec déférant protection ont subi un cycle thermique (240C° pendant 120 mn) [92].*

Mark F. Green en 2006 [93], Leur étude est consiste a étudié le comportement des colonnes de béton enveloppés par des matériaux polymères renforcés de fibres (PRF) lorsqu'il est exposé à plusieurs conditions extrêmes

Pour l'exposition des régions froides, des échantillons en FRP cylindres enveloppés (152 \* 305 mm) sont exposés à des températures aussi basses que – 40°C ou jusqu'à 300 cycles de gel-dégel (- 18°C à +15°C).



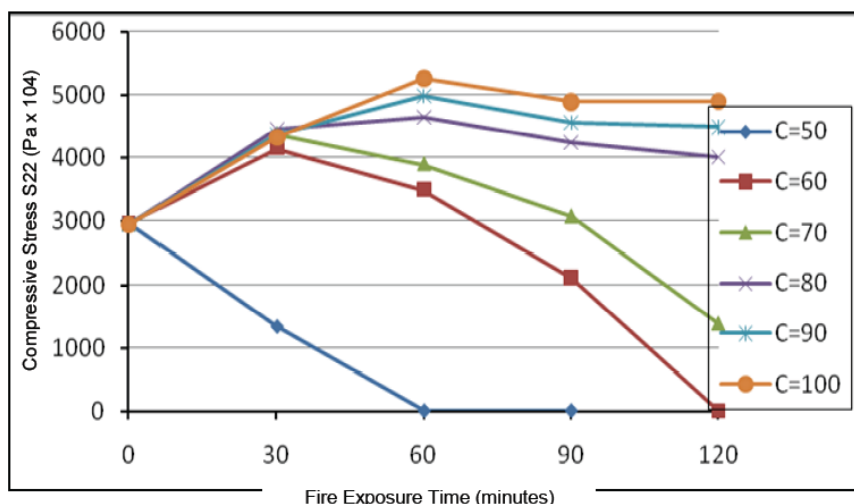
**Figure V.3 :** *Spécimens exposés à des températures aussi basses que  $-40^{\circ}\text{C}$  ou jusqu'à 300 cycles de gel-dégel ( $-18^{\circ}\text{C}$  à  $+15^{\circ}\text{C}$ ). [93]*

Des colonnes en béton armé à grande échelle ( $400 * 3800\text{ mm}$ ) sont exposés à un feu standard sont décrits et discutés. Dans l'ensemble, les résultats démontrent que les colonnes en béton confiné par (PRF) testées en compression axiale concentrique ont un rendement adéquat sous plusieurs conditions extrêmes telles que la faible température, l'action du gel-dégel, à la corrosion de l'armature interne, et le feu.

Katy Branthwaite en 2007 [94], à fait des analyses par éléments finis en utilisant les programmes d'ordinateur ABAQUS. Modèles des colonnes de béton renforcées de PRF-barres d'armature ont été faites. Ils ont varié l'épaisseur de la FRP et ont supposés être entouré par un feu suivant une courbe au feu standard.

Une charge uniformément répartie, est appliquée au-dessus des colonnes, et les colonnes ont ensuite été testés à 30min d'intervalle afin d'analyser les effets de l'incendie Les déplacements et les contraintes qui en résultent ont été interprétées de manière à faire une comparaison entre les effets de l'épaisseur de recouvrement et la durée d'exposition au feu à l'FRP renforcé colonnes de béton dans un incendie simulé.

Après l'analyse, contrainte dans la direction verticale et les déplacements verticaux de ceux-ci colonnes en béton armé de PRF a été pris en compte.



**Figure V.4 :** Effets de l'épaisseur de recouvrement et la durée d'exposition au feu à l'FRP renforcé colonnes de béton dans un incendie simulé [94].

Ces résultats ont ensuite été interprétés et il a été conclu les points suivants avec référence aux objectifs initiaux de ce projet :

Plus la période de temps que les colonnes en béton armé de PRF sont exposées à feu, plus la taille des déplacements verticaux de la colonne.

Le temps que les colonnes en béton armé de PRF sont exposés au feu augmente, la souligne dans la direction verticale dans le béton au centre de la colonne augmente.

Augmentation de l'épaisseur de la couverture diminue la contrainte dans la direction verticale.

Les colonnes modélisées dans ce projet ne seraient pas approprié pour la construction et l'utilisation dans un immeuble de bureaux de grande hauteur, les contraintes produites lors de l'incendie sont au-dessus des quantités acceptables dans le béton.

Il a été constaté que la colonne exposée au feu pendant 120 minutes avec une épaisseur de la couverture de 50 mm n'a pas pu être analysé par ABAQUS, donc il n'y a pas de résultats pour cette modèle et cette colonne est supposée avoir échoué.

Yousef A. Al-Salloum et al en juillet 2009 [95], ont étudié l'effet d'une température élevée sur la performance du béton confiné à l'extérieur de tissu de PRF. A cet effet, une expérimentation en deux phases a été réalisée. Dans la première phase, 42 éprouvettes de 100\*200 mm cylindres de béton ont été préparé. Sur ces échantillons, 14 cylindres ont été laissés non confiné; 14 échantillons ont enveloppé avec une couche de tissu de fibre de carbone, et les 14 échantillons restants ont été confinés avec une couche de feuille de GFRP. Quelques-uns des éprouvettes non confinés et FRP confiné ont été exposés à la température ambiante, tandis que, d'autres cylindres ont été exposés à régime de chauffage de 100°C et

200°C pendant une durée de 1, 2 ou 3 h. Après haute température d'exposition, les échantillons ont été testés en compression uni-axiale jusqu'à la rupture.

Les résultats des tests ont démontré que, à une température de 100 C (un peu plus que la température de transition vitreuse (T<sub>g</sub>) de la résine époxy), deux spécimens CFRP et GFRP-emballés subi une perte petite force résultant de fusion de l'époxy. Cette perte de résistance a été plus prononcée lorsque la température atteint 200°C.

La deuxième phase du programme expérimental, trois 100\* 100\* 650 mm prismes de béton ont été préparés et ensuite recouverte par une couche de fibre de carbone et GFRP stratifiés pour essais de résistance à l'arrachement selon la norme ASTM D4541 - 09. L'objectif de cet essai était d'évaluer la dégradation de l'adhérence entre les PRF et le substrat de béton lorsqu'ils sont exposés à des environnements à température élevée.

Un prisme a été exposé à la température ambiante alors que les deux autres spécimens ont été exposés à régime de chauffage 100°C et 200°C pendant une période de 3 h. Il a été conclu qu'une dégradation significative dans le lien la force produite à une température de 200°C en particulier pour les échantillons CFRP superposées.

Ershad Ullah Chowdhury en Décembre 2009 [96], Ce travaille présente les résultats d'une étude en cours sur le comportement des colonnes en béton enveloppés par PRF vis-à-vis au feu, l'objectif global de l'étude est de comprendre le comportement au feu des matériaux renforcé par polymère renforcé de fibre (PRF) et finalement, de formuler des recommandations de conception de sécurité incendie rationnelles et des lignes directrices pour renforcé les colonnes en béton par les PRF. Une étude expérimentale et numérique combinée a été menée pour atteindre l'objectif de cette étude. Le travail expérimental constitué de deux matériaux en PRF à petite échelle essais à des températures élevées et des essais d'incendie à grande échelle sur des colonnes renforcées de PRF.

Un modèle numérique a été développé pour simuler le comportement du béton armé et non emballés PRF renforcé carré de béton ou des colonnes rectangulaires en feu.

Après validation du modèle numérique contre les données expérimentales disponibles dans la littérature, il a été déterminé que le modèle numérique peut être utilisé pour analyser de comportement du béton membres de compression axiale dans le feu.

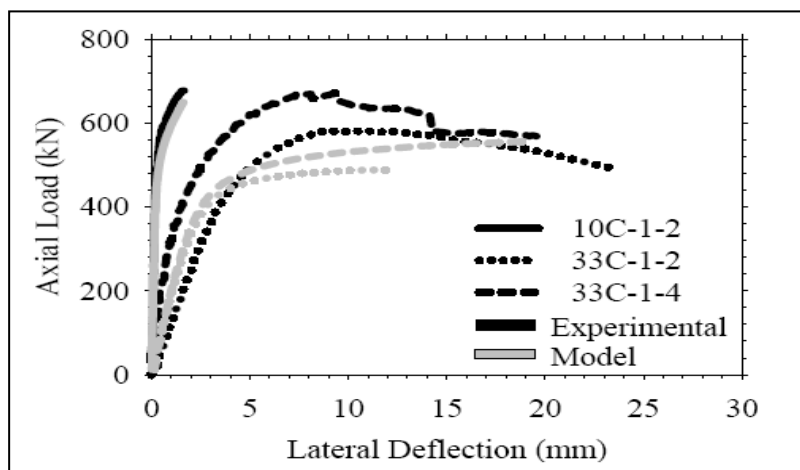


Figure V.5 : Variation de déformation en fonction de la force (les lignes noires correspondent aux données obtenues lors des essais, les lignes grises aux résultats prévus par les modèles) [96]

Les résultats de cette étude ont également montré que, bien que les matériaux renforcés par PRF et d'après les expériences, ils perdent considérablement leurs propriétés mécaniques et de liaison à des températures un peu en dessous de la transition vitreuse

1. Une grande partie de la dégradation de la liaison mécanique et PRF-à-PRF se produit en dessous de la température de transition vitreuse de la PRF. Le matériau GFRP testé dans l'étude actuelle subit une perte de 50% en résistance à la traction, une perte de 30% du module d'élasticité à la traction, et une perte de 60% de la force de la liaison FRP-à-FRP à des températures de 15°C en dessous de la température de sa matrice de résine époxy.

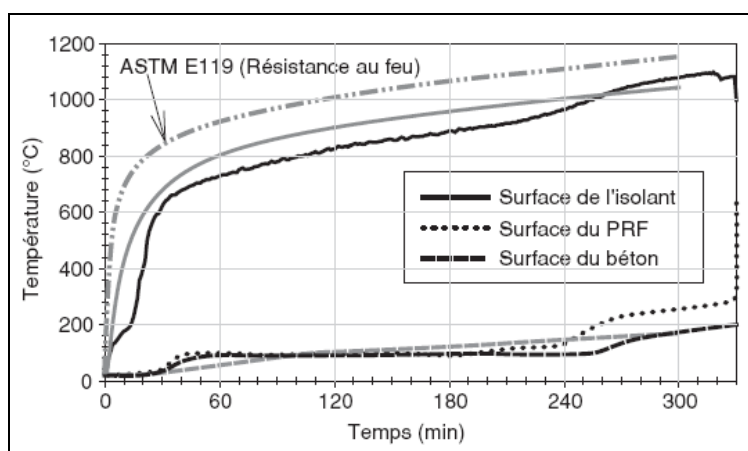
2. Le matériau GFRP testé dans l'étude actuelle peut, avec un ancrage suffisant, maintenir 40% de sa résistance à la traction et à 70% de son module d'élasticité à des températures considérablement supérieures à la température de transition vitreuse de leurs résines.

3. Environ 90% de la force de liaison PRF-à-FRP a été perdue à des températures légèrement au-dessus de la température de transition vitreuse de PRF spécimens lap-épissage, qui a un chevauchement longueur de 50 mm. Bien que la dégradation de la force de liaison PRF-à-FRP était plus grave que la détérioration de la résistance à la traction.

N. Benichou, et al en 2010 [97], ont étudié la résistance au feu des systèmes de polymères renforcés de fibres (PRF) encollés à l'extérieur, utilisés pour réparer des éléments de structure de béton endommagés. La recherche a montré que les systèmes de PRF qui comprennent une isolation spécialement conçue à cet effet permettent à des éléments de structure de béton réparés ou renforcés de dépasser les 4 heures de résistance au feu exigées dans les codes du bâtiment.



Dans tous les cas, la résistance au feu a été satisfaisante même si la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) de la matrice polymère des PRF avait été dépassée relativement tôt pendant les essais.



**Figure V.6 :** Températures mesurées et prévues pour Poteau (les lignes noires correspondent aux données obtenues lors des essais, les lignes grises aux résultats prévus par les modèles) [97]

La recherche a permis d'obtenir plusieurs résultats importants qui augmenteront le niveau de confiance pour utiliser des systèmes de PRF en vue de réparer et de renforcer des éléments de béton armé dans des bâtiments, là où la résistance au feu est l'une des principales considérations au moment de la conception :

1. La défaillance des PRF protégés par un isolant ne signifie pas que l'élément de béton renforcé ne satisfera pas aux exigences en matière de résistance au feu.
2. Les structures en béton renforcées de PRF peuvent atteindre des degrés de résistance au feu supérieurs à 4 heures si une isolation protectrice appropriée est mise en place.
3. Si l'on utilise des PRF pour réparer du béton, cela signifie qu'après un incendie, il peut être possible de ne remplacer que le système de PRF (PRF + Isolant) au lieu de remplacer l'élément de béton renforcé.

Maréchal [98] montre l'évolution de coefficient de poisson ( $\nu$ ) déterminé pour le béton ordinaire et qui diminue en fonction de la température de 0,28 à température ambiante pour une valeur de 0,1 à 400°C. Cette diminution est le résultat de la rupture des liaisons internes à la microstructure et du développement de la microfissuration au cours du chauffage. En dehors de c'étude, ce coefficient est égal à 0,2 généralement pour le béton.

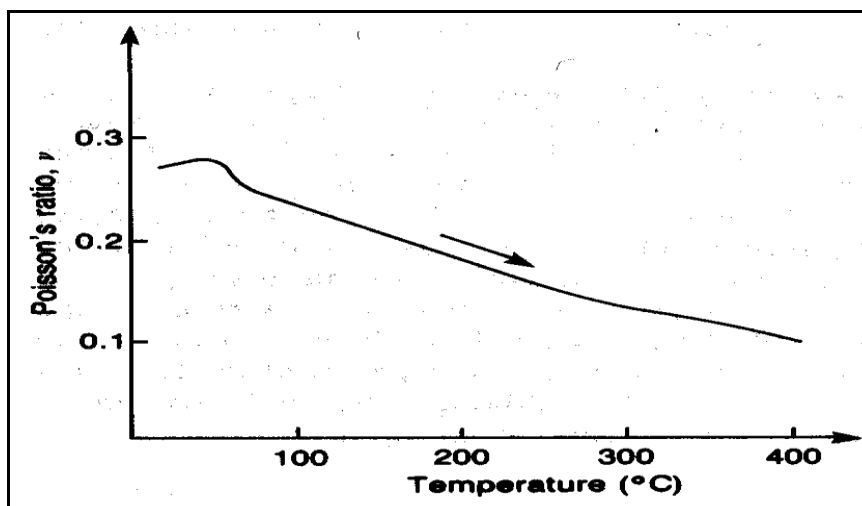


Figure V.7 : Evolution du coefficient du Poisson en fonction de la température pour le béton. [98]

## V.2. Programme expérimental

Dans ce travail expérimental, des spécimens cylindriques de béton de 220 mm de longueur et de diamètre de 110 mm ont été confectionnés.

Au total, cinquante-quatre (54) Spécimens cylindriques ont donc été fabriqués. Ces éprouvettes sont réparties de la manière suivante :

- Neuf (09) échantillons de béton ordinaires (BO),
- Vingt-sept (27) échantillons renforcés par une couche de fibre de verre (BR-FV), dans laquelle neuf spécimens (09) ont été protégés par une couche de mortier (BR-FVM) et neuf(09) autres ont été protégés par une couche de plâtre (BR-FVP).
- Dix-huit (18) échantillons de béton renforcées par une couche de fibre de carbone (BR-FC), dans lequel six (06) spécimens ont été protégés par une couche de mortier (BR-FCM) et six autres (06) protégés par une couche de plâtre (BR-FCP)

Dans le programme expérimental, trois variables expérimentales ont été définis tel que le type de FRP utilisé pour le renforcement, la température et le type de couche de protection. L'objectif était de déterminer comment la température affecteraient le composite et de vérifier l'efficacité des différents types de protection passive vis-à-vis a cette température. Le tableau 1, résume les différentes variables étudiés, la notation et le nombre des éprouvettes testés dans ce travail :

**Tableau V.1: Notation des éprouvettes**

Température (°C)	Béton Ordinaire	Spécimens confiné par GFRP			Spécimens confiné par GFRP		
		BR-FV	BR-FVP	BR-FVM	BR-FC	BR-FCP	BR-FCM
23	3	3	3	3	2	2	2
120	3	3	3	3	2	2	2
350	3	3	3	3	2	2	2
54 échantillons							

### V.2.1. Matériaux utilisés

#### a. Composition du béton

##### ❖ Ciment

Dans notre travail on a utilisé un ciment CEMII 42.5 (Matine) commercialisé par la société LAFARGE. Les caractéristiques physiques et mécaniques de ce ciment sont inscrits dans le tableau ci-dessous :

**Tableau V.2: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.**

Consistance normale (%)	Délais de prise (min)		Masse spécifique (g/cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
	Début de prise	Fin de prise			2j	7j	28j	2j	7j	28j
23	155	320	3.02	4345	19	29	43	4.6	5.3	7.3

##### ❖ Granulats

Deux types de sable ont été utilisés : sable grossier (BAGHLIA) et sable fin de OUED SOUF, et deux types de graviers, **3/8** et **8/15** provient de la carrière de KADARA. Le tableau suivant représente les différentes caractéristiques des granulats

**Tableau V.3: Caractéristiques physiques des granulats.**

Caractéristiques	Sable	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue (t/m <sup>3</sup> )	2.67	2.65	2.68	2.73
Masse volumique apparente (t/m <sup>3</sup> )	1.5	2.14	1.411	1.415
Teneur en eau.	1.4	5.23	2.8	0.00
Module de finesse (%)	2.06	3.78	/	/
E.S.P (%)	71	70.3	26.7	9.13
Los angeles (%)	/	/	23.02	27.22
Micro deval (%)	/	/	22.2	16.3

##### ❖ Analyse granulométrique des granulats

L'analyse granulométrique des constituants (gravier, sable) a été faite selon la norme **NF P18-560**, les courbes granulométriques sont représentées dans la figure ci-dessous.

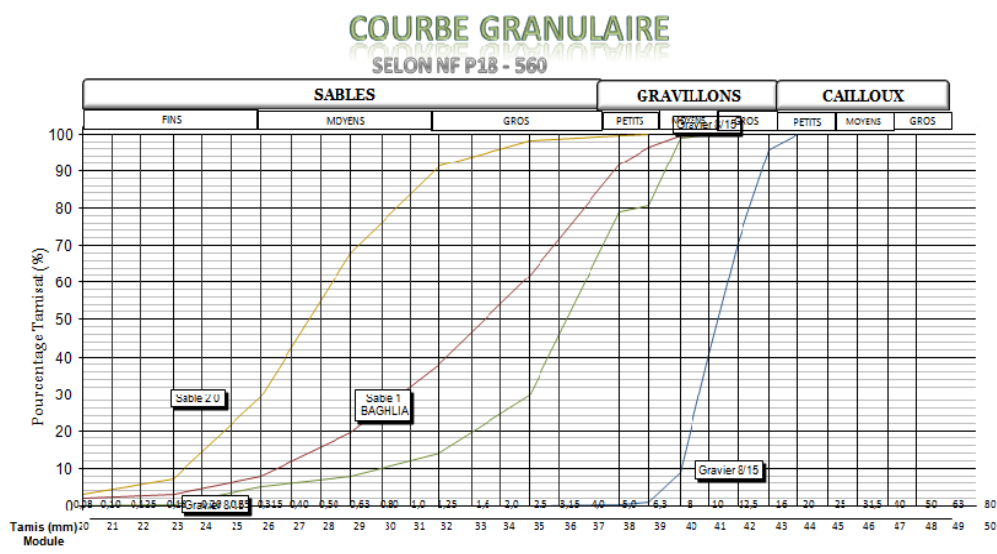


Figure V.8 : Courbe granulométrique des différents granulats.

### ❖ Formulation du béton

La formulation de béton a été faite par la méthode dite FAURY [99]. D’après le calcul, les compositions finales de bétons obtenus possédant une classe de résistance : 25MPa, sont données dans le tableau suivant :

Tableau V.4: Formulation du béton en (Kg/m<sup>3</sup>).

Constituants	Quantité (Kg)
Ciment	400
Eau	200
Gravier 8/15	807
Gravier 3/8	289
Sable grossier	336
Sable fin	346
Masse volumiques	2378 (Kg/m <sup>3</sup> )

### b. Matériau composite

Deux type de matériaux composites on a utilisé dans ce travail, le premier est composé d’un tissu en fibres de carbone SIKA WRAP HEX 230C, et se présente sous forme de rouleau de 3,5m de longueur et 0,3m de largeur avec une épaisseur de 1mm ; provenant de l’entreprise SIKA ELJAZAIR, le deuxième est un tissu en fibres de verre fibre de verre continues type E d’une épaisseur de 0.25 mm (ISO 4603) et d’un poids spécifique de 300 g/m<sup>2</sup>.

Les propriétés mécaniques des deux tissus composites utilisés sont donnés le tableau suivant:

**Tableau V.5 : Propriétés mécaniques des PRF utilisé [100-101].**

	Fibre de verre	Fibre de carbone
Résistance à la traction (MPa)	69-86	345-690
Module d'élasticité en traction (Gpa)	74	> 165
Allongement a la rupture en traction (%)	4,5	1.7
Résistance à la compression (MPa)	/	/



a) Tissu de fibres de carbone      b) Tissu de fibres de verre

**Figure V.9 : Matériau composite**

La résine utilisée pour le collage des matériaux composites sur le support béton (Figure V.3) est une résine organique à performance élevées de type époxy conçue par la société GRANITEX (Algérie) appelé Médapoxy STR. La résine est désignée par la lettre A et le durcisseur par la lettre B.



Elément A (Durcisseur)

Elément B (Résine)

**Figure V.10 : Résine utilisée.**

Le tableau V.6, présent les caractéristiques de la résine utilisé (selon la fiche technique)

**Tableau V.6 : Présentation des caractéristiques de la résine**

Caractéristiques	Résultats	Unités
La densité (ISO758)	1,1 ± 0.05	-
La viscosité (NF T76-102)	11000	MPa S à 25°C
Durée pratique d'utilisation (NFP18 810)	1 h15mn à 20°C et 65 % HR	Heures
Résistance à la compression (NA 427)	> 70	MPa
Résistance à la flexion (NA 234)	> 25	MPa
Adhérence sur béton	> 3	MPa

## V.2.2. Préparation des éprouvettes confinée par PRF

Après la confection des éprouvettes de béton, le chemisage (Application du renfort) est réalisé selon les étapes suivantes :

### -Préparation du support :

Le bon fonctionnement d'une réparation ou d'un renforcement par le procédé chemisage avec les matériaux composites exige un support de bonne qualité :

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air est inférieure à 80%.

La préparation du support béton a pour objectif d'éliminer toute trace superficielle, de graisse de laitance et de toute partie hétérogène. La surface des éprouvettes est nettoyée par polissage à l'aide d'une brosse métallique puis dépoussiérée à l'aide d'un chiffon



a) Polissage par brosse métallique



b) Dépoussiérage par un chiffon

**Figure V.11 : Préparation du support**

### -Découpage du tissu:

Le tissu est découpé soigneusement aux dimensions souhaitées (supérieures à celles des éprouvettes de quelques centimètres).

Une fois coupé, le tissu doit rester soit à plat, soit enroulé. En aucun cas, il ne doit être plié afin de ne pas endommager les fibres.



a) Fibre de verre



b) fibre de carbone

**Figure V.12 : Découpage de tissu**

### -Préparation de la résine :

Les exigences à respecter sont les suivantes :

- Le produit mélangé a une durée de vie limitée, quelques minutes à 20°C.
- Terminer tous les préparatifs avant la préparation du mélange et ne préparer que la quantité du mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant du Médapoxy STR, afin d'obtenir un mélange homogène.
- Verser l'élément B (durcisseur) dans l'élément A (résine) en veillant à respecter le rapport de mélange 666g d'élément B pour 1kg d'élément A.
- Racler plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale

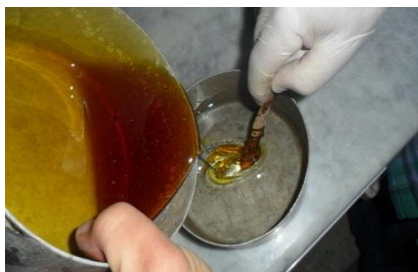


Figure V.13 : Préparation de la matrice

### - Application du renfort :

Les étapes à suivre pour l'application du renfort sont :

- Appliquer une première couche de MEDAOXY STR sur la surface de l'éprouvette et la répartir à l'aide d'un rouleau.
- Positionner et placer manuellement le tissu sur le support.
- Presser fortement
- Presser une deuxième fois avec le rouleau.
- Le marouflage soigné doit être poursuivi jusqu'à obtenir un reflux continu sur les bords.
- Enlever l'excédent de colle avec une spatule et ne pas le réutiliser.
- Laisser durcir 10 jours avant la mise en service.



a)Fibre de carbone

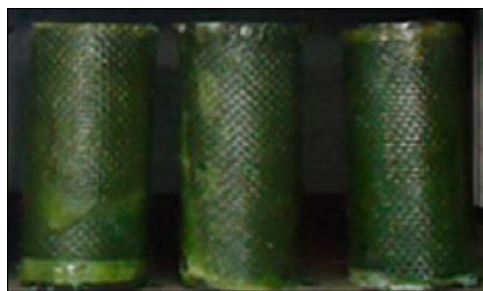


b) Fibre de verre

Figure V.14 : Application du renfort



a) Fibre de carbone



b) Fibre de verre

Figure V.15 : Eprouvtes confinées

### V.2.3. Protection des éprouvettes par les mortiers

Dans cette partie on va procéder à la protection des éprouvettes confinées par une couche de 1cm en matériaux cimentaires (plâtre de construction ou mortier de ciment), dont le but de protéger les matériaux composites PRF vis-à-vis des hautes températures.

#### ➤ Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette partie sont :

-Sable fin de Boussaâda

-Ciment CEMII 42.5 (Matine) commercialisé par la société LAFARGE

-Plâtre connu sous le nom commercial KNAUF.

Le plâtre a été préparé avec un rapport E/P = 0.75, et le mortier de ciment a été préparé avec un rapport (E/C = 0.5, sable / ciment= 3)

Les photos suivantes représentent les éprouvettes confinées et protégées par une couche de plâtre et une couche en mortier de ciment.



Figure V.16 : Eprouvtes confinée et protégée par plâtre



Figure V.17 : Eprouvtes confinée et protégé par mortier



#### V.2.4. Procédures de traitement thermique des éprouvettes préparées

Les échantillons cylindriques ont été soumis à un traitement thermique utilisant un four électrique (figure V.18). Le four est équipé d'un panneau électronique pour contrôler automatiquement la température et le temps d'exposition. Les colonnes renforcées en groupes de trois, ont été soumis à 120 et 350°C pendant 2 h puis en laisse refroidir dans le four.



Figure V.18 : Four électrique utilisée pour le traitement thermique

Le cycle temps-température utilisée dans le traitement thermique des échantillons et représenté dans la Figure (V.19). Après refroidissement, les colonnes ont été retirées du four et maintenue dans un état sec à la température ambiante du laboratoire.

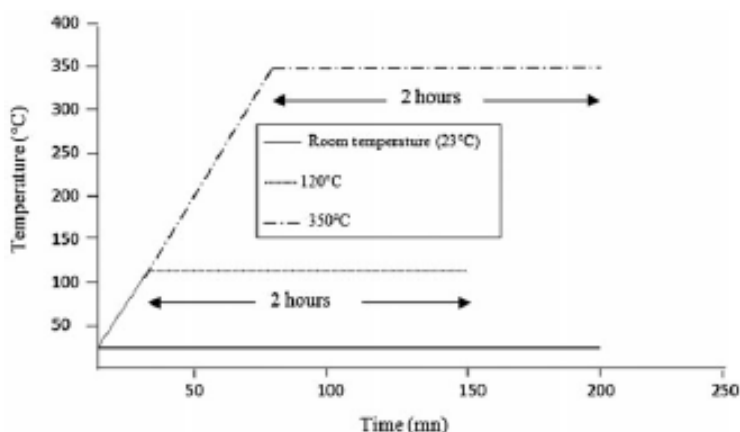


Figure V.19 : Cycle de traitement thermique des échantillons.

#### V.2.5. Procédures d'essais (essai de compression axiale)

L'essai de compression a été faite selon la norme NF EN 13390-9. Les cylindres sont soumis à une charge de compression uni-axiale jusqu'à la rupture. L'ensemble des spécimens cylindriques ont été systématiquement soumis à un surfacage avec un mortier contenant du

soufre et de sable. Cette méthode à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette a base de soufre respectant les deux exigences : planéité et perpendicularité aux génératrices. La planéité est assurée par le fait que le mélange soufre, porteur a une température de  $125^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , est liquéfié et versé sur une platine dont le fond a été rectifié. La perpendicularité est obtenue grâce à un dispositif de guidage qui maintient la génératrice de l'éprouvette perpendiculaire au fond du moule. Voir la figure V.20.



*Figure V.20 : Surfaçage des éprouvettes par le soufre*

La machine utilisée en question est une presse hydraulique avec une étendue de 3000 KN. Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et l'autre supérieur fixe est une rotule de type Autotest (figure V.21). Un taux de chargement quasi-statique est appliqué avec une vitesse de 0.6 MPa/s. A mi-hauteur au milieu de deux faces opposées, ont été mesurées, à intervalles rapprochés les forces et les déformations axiales. Le raccourcissement à la compression est mesuré par extensomètre.



*Figure V.21 : Installation d'essai de compression axiale.*

### V.3. Résultats et discussions

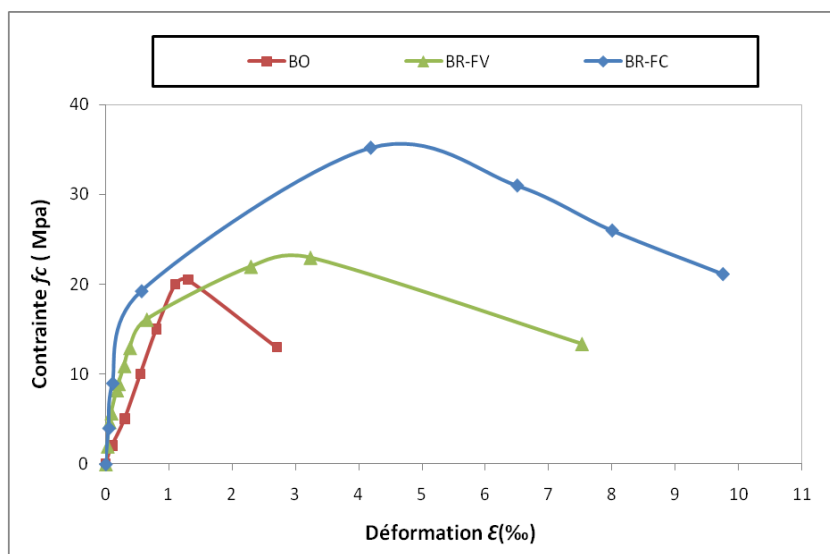
#### V.3.1. Effet de confinement

Dans cette partie, les gains de résistance et de ductilité fourni par le tissu de fibre de verre et le tissu de fibre de carbone au béton ont été étudiés, les résultats sont présentés dans le tableau V.6 et la figure V.22.

**Tableau V.7:** Résistance à la compression et déformation de béton ordinaire et béton confiné

spécimens	Béton ordinaire			Béton confiné				
	$f_{bo}$ (MPa)	$\epsilon_{bo}$ (‰)	$\epsilon_u$ (‰)	$f_{bc}$ (MPa)	$\epsilon_{bc}$ (‰)	$\epsilon_{cu}$ (‰)	$f_{bc}/f_{bo}$	$\epsilon_{bc}/\epsilon_{bo}$
BO	20.5	1.3	2.7	/	/	/	/	/
BR-FV	/	/	/	23	3.23	7.50	1.12	2.48
BR-FC	/	/	/	35	4.18	9.75	1.70	3.21

La figure suivante présente la Courbe contrainte-déformation de béton ordinaire et béton confiné



**Figure V.22 :** Courbe contrainte-déformation de béton ordinaire et béton confiné

Les mêmes constatations dans le comportement des bétons confinés sont observées en comparaison avec des échantillons de béton non confinés. Toutes les courbes montrent une pente initiale jusqu'à un point d'inflexion, suivie d'une grande zone de déformation plastique. Selon l'efficacité de confinement, le niveau de contrainte et la zone plastique varient considérablement selon le type de composite utilisé pour le confinement; Ces résultats ont également été confirmés par d'autres chercheurs [102-103]. Cependant, les valeurs de la contrainte correspondante à la rupture des colonnes sont beaucoup plus élevées. Le

confinement par des matériaux composites peuvent augmenter de manière significative la charge de rupture, mais avec des degrés différents en fonction des types de matériaux composites utilisés. Les résultats obtenus de résistance à la compression et de déformation montre l'efficacité du composite en tant que renfort sont présentées dans le tableau (V.7), les rapports ( $f_{bc}/f_{bo}$ ) et ( $\mathcal{E}_{bc}/\mathcal{E}_{bo}$ ) sont toujours très importante, présentant des valeurs supérieures à un. Les cylindres de béton confiné par le tissu en fibres de carbone ont montrés un gain de résistance à la compression et la déformation axiale d'environ 70% et 221% (tableau V.7), respectivement. Cependant, les échantillons confinés par fibre de verre présentent des gains de 12% et 148%,( tableau V.7), respectivement. Les spécimens de béton confiné par fibre de carbone présentent une déformation maximale d'environ 4200 mm/m.

Les différents matériaux composites offrent un module d'élasticité et une rigidité qui peut modifier le comportement axiale du béton confiné, et d'améliorer sa résistance et sa ductilité, cette amélioration peut s'expliquer par les caractéristiques de texture fibreuse, qui a une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Les matériaux composites vont jouer plusieurs rôles, le rôle principal est de confiner le béton, ce qui lui donne une plus grande réserve de résistance et de ductilité, le deuxième rôle est d'exercer une compression de pré charge radiale au béton, empêche la distribution des fissures, donc on obtient un matériau moins fragile; plus ductile, il faut plus d'énergie pour faire avancer la fissure. Enfin, après la rupture, le noyau de béton restent emprisonnés à l'intérieur du tissu composite et reste ininterrompue, ce qui conduit à une rupture progressive de l'élément contrairement au béton non confiné qui présente une rupture brutale.

### **V.3.2. Effet de la température**

Les figures V.23, V.24 et V.25 montrent l'effet de la température sur les courbes contrainte-déformation du béton ordinaire et confinés par fibres de verre (BR-FV) et fibres de carbone (BR-FC), respectivement.

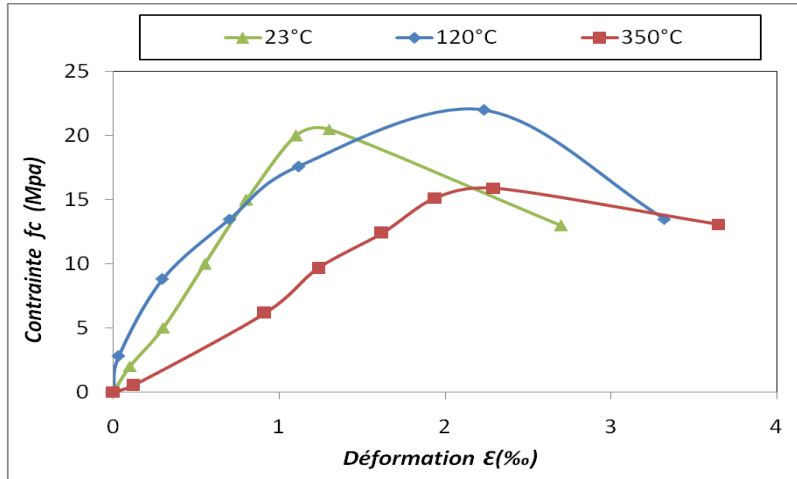


Figure V.23 : Courbe contrainte-déformation du béton ordinaire (BO)

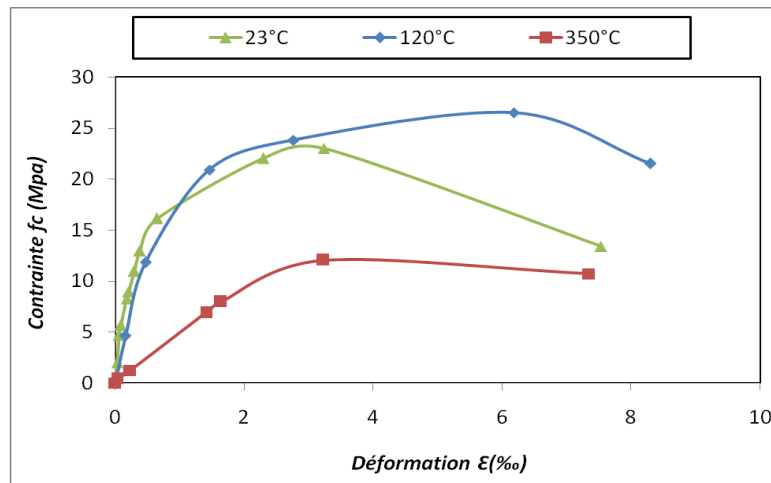


Figure V.24 : Courbe contrainte-déformation de béton confiné par fibre de verre soumis à différent températures (BR-FV)

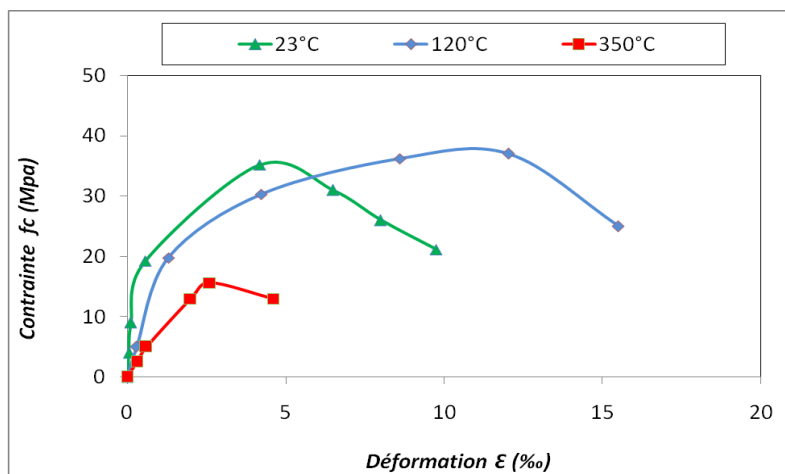
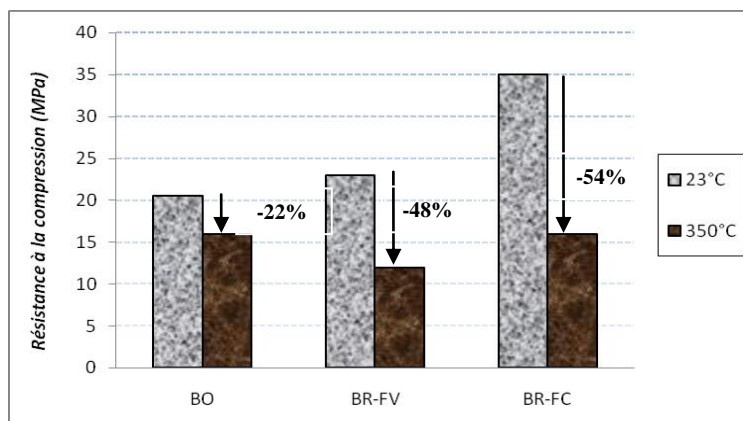


Figure V.25 : Courbe contrainte-déformation de béton confiné par fibre de carbone soumis à différent températures (BR-FC)

La figure V.26 montre l'effet de la température sur la résistance à la compression du béton ordinaire et béton confiné



**Figure V.26 :** Effet de la température sur la résistance à la compression du béton ordinaire et béton confiné

On peut observer à partir de ces figures que pour tous les échantillons, la première branche est linéaire et présente la rigidité de l'éprouvette. La valeur de la rigidité et la résistance à la compression diminue évidemment en fonction de l'augmentation de la température de 23°C à 350°C. Après la fissuration, les déformations augmentent rapidement jusqu'à la résistance ultime. En comparons les éprouvettes soumises à une température de 350°C avec celle à température ambiante (23°C), la diminution de la résistance à la compression des bétons confinés par fibres de verre (BR-FV) ou fibres de carbone (BR-FC) sont plus grand que le béton non confiné (BO), toutefois, la valeur de la déformation est plus élevée. Les diminutions de résistance à la compression sont de l'ordre de 22%, 48% et 54% pour le béton ordinaire, BR-FV et BR-FC, respectivement (figure V.26); Cette observation est cohérente avec les recherches antérieures sur les propriétés résiduelles de béton exposé au feu [104]. La diminution de la résistance à la compression est due à la dégradation à la fois de béton et composites après avoir été soumis à la température de 350°C. A cette température, le béton perd l'eau libre et les hydrates de silicate de calcium (CSH) commencent à perdre leurs propriétés liantes, en outre; le PRF est brûlée à haute température. Il provoque en outre la décomposition de la fibre. Les fibres de carbone et verre perdent leur effet de renforcement et les colonnes de béton perdent leur capacité structurelle. Des études antérieures indiquent clairement que le matériau de liaison (l'adhésif) ramollir à des températures proches de la température de transition vitreuse, ce qui conduit à une réduction significative de la résistance et de module d'élasticité [105].

Les tableaux V.8 et V.9, représentant les résistances à la compression et les déformations des éprouvettes de béton ordinaire et confiné soumises à différentes températures.

**Tableau V.8 : Résistance à la compression et déformation de béton ordinaire à différentes températures.**

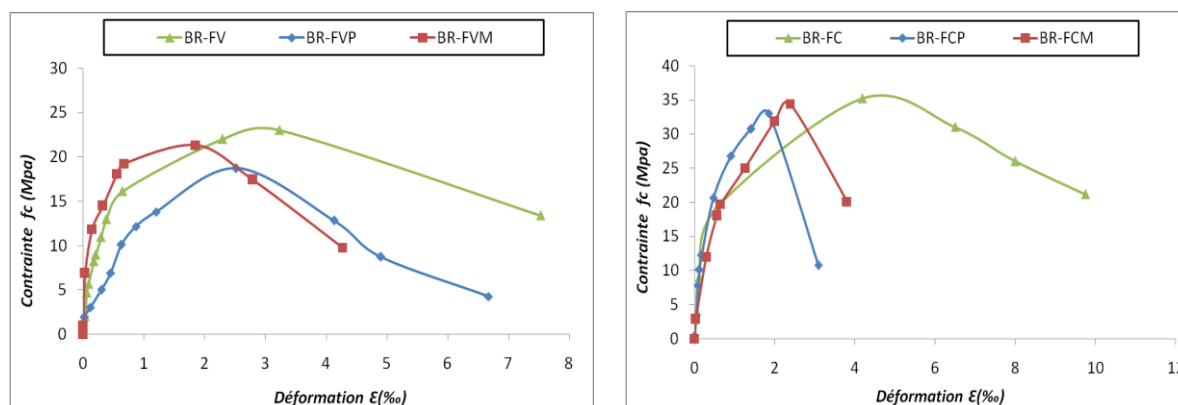
Température (°C)	Béton ordinaire (OC)			
	Contrainte $f_c$ (MPa)	Déformation $\epsilon$ (‰)	Contrainte Ultime $f_u$ (MPa)	Déformation ultime $\epsilon_u$ (‰)
23	20.5	13	13	2.7
120	22	13.5	13.5	3.32
350	16	229	13	3.65

**Tableau V.9 : Résistance à la compression et déformation des bétons confinés à différentes températures**

Température (°C)	Contrainte $f_{bc}$ (MPa)	Déformation $\epsilon_{bc}$ (‰)	Contrainte Ultime $f_{bu}$ (MPa)	Déformation ultime $\epsilon_{bu}$ (‰)
Béton confiné par fibre de verre BR-FV				
23	23	3.23	13.5	7.5
120	26.5	6.18	21.5	8.3
350	12	3.23	11	7.35
Béton confiné par fibre de carbone BR-FC				
23	35	4.18	21	9.75
120	37	12.04	25	15.5
350	16	2.6	13	4.6

### V.3.3. Effet de la couche de protection

Les figures V.27, V.28 et V.29 montrent les courbes contrainte-déformation comparatifs des échantillons de béton confiné avec des échantillons de béton confinés et protégées par une couche de plâtre ou de mortier, à des températures de 23°C, 120°C et 350°C respectivement.



**Figure V.27 : Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé à la température ambiante (23°C)**

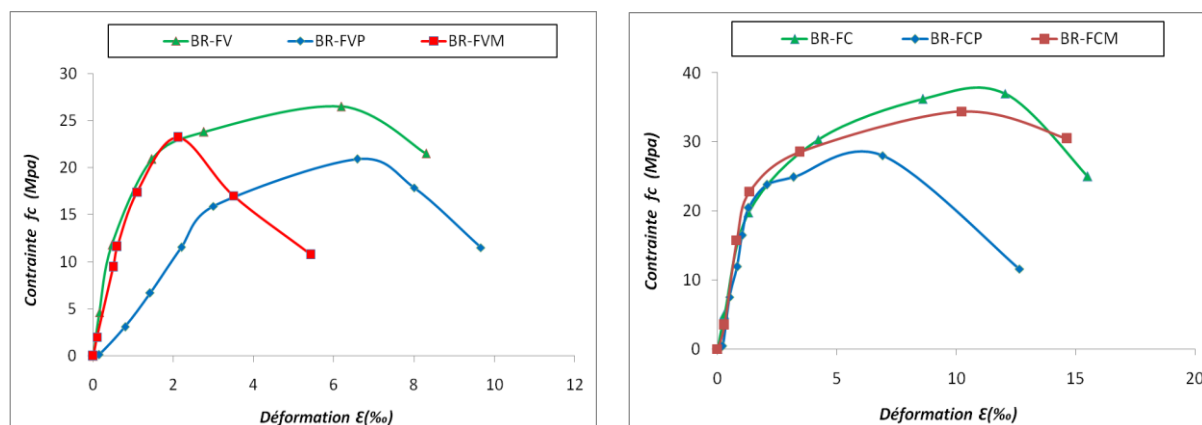


Figure V.28 : Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé exposés à une température de 120°C

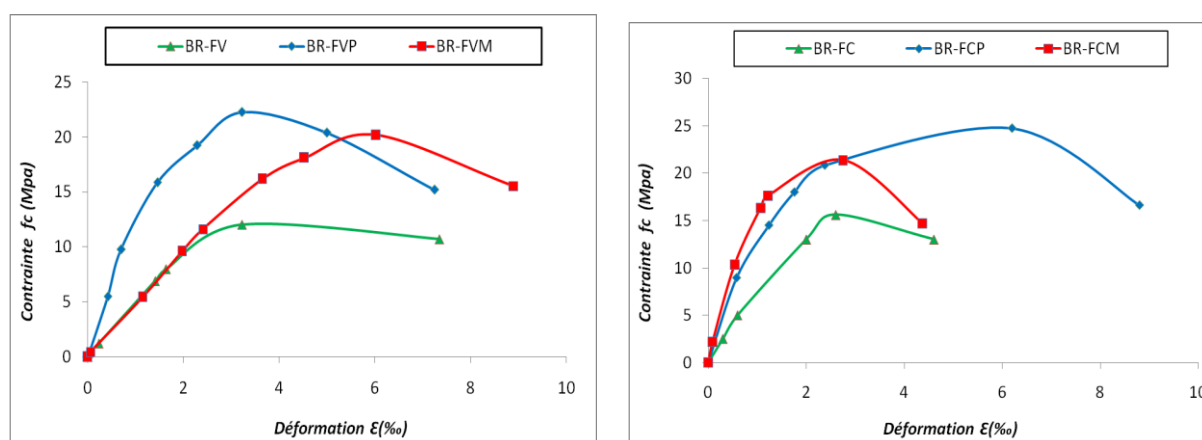


Figure V.29 : Courbes contrainte-déformation de béton confiné et béton confiné protégé exposés à température de 350°C

Les résultats expérimentaux sont représentés dans les tableaux V.10 et V.11, y compris les contraintes au pic et la contrainte à la rupture pour chaque groupe de spécimens testés. En comparant les valeurs de résistance à la compression et la déformation des spécimens de béton confinés par fibre de verre et fibre de carbone avec ceux qui sont protégés par une couche de plâtre ou de mortier, les gains de la résistance et la déformation sont illustrés dans les histogrammes V.30 et V.31.

Nous constatons que tous les échantillons ont subis une loi de comportement qui se décompose en trois phases, comme il est montré par d'autres travaux de recherche [106-107]:

- 1) une phase pratiquement linéaire avant microfissuration du béton qui reste similaire au béton témoin.
- 2) une phase courbée de la partie ascendante au cours de laquelle le béton se microfissure, le tissu PRF et la couche de protection se mettent en tension.



3) une phase descendante au cours de la quelle l'effort est repris par les fibres et la couche en matériaux cimentaire qui rassemblent le béton fissuré jusqu'à la rupture.

**Tableau V.10 : Résultats expérimentaux de béton confiné avec fibre de verre et béton confinés protégées**

spécimens	Béton confiné			Béton confiné protégé				
	$f_{bc}$ (MPa)	$\epsilon_{bc}$ (‰)	$\epsilon_{bu}$ (‰)	$f_{bcp}$ (MPa)	$\epsilon_{bcp}$ (‰)	$\epsilon_{bup}$ (‰)	$f_{bcp} / f_{bc}$	$\epsilon_{bcp} / \epsilon_{bc}$
Temperature = 23°C								
BR-FV	23	3.23	7.5	/	/	/	/	/
BR-FVP	/	/	/	19	2.52	6.67	0.83	0.78
BR-FVM	/	/	/	21	1.85	4.26	0.91	0.57
Temperature = 120°C								
BR-FV	26.5	6.18	8.3	/	/	/	/	/
BR-FVP	/	/	/	21	6.58	9.66	0.79	1.06
BR-FVM	/	/	/	23	2.11	5.42	0.87	0.34
Temperature = 350°C								
BR-FV	12	3.23	7.35	/	/	/	/	/
BR-FVP	/	/	/	22	3.23	7.25	1.83	1
BR-FVM	/	/	/	20	6.03	8.9	1.66	1.87

**Tableau V.11 : Résultats expérimentaux de béton confiné avec fibre de carbone et béton confinés protégées**

spécimens	Béton confiné			Béton confiné protégé				
	$f_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$ (‰)	$\epsilon_{cu}$ (‰)	$f_{ccp}$ (MPa)	$\epsilon_{ccp}$ (‰)	$\epsilon_{cup}$ (‰)	$f_{ccp} / f_{cc}$	$\epsilon_{ccp} / \epsilon_{cc}$
Temperature = 23°C								
BR-FC	35	4.18	9.75	/	/	/	/	/
BR-FCP	/	/	/	33	1.85	3.08	0.97	0.44
BR-FCM	/	/	/	34.5	2.38	3.8	0.98	0.57
Temperature = 120°C								
BR-FC	37	12.04	15.5	/	/	/	/	/
BR-FCP	/	/	/	28	6.91	12.64	0.76	0.57
BR-FCM	/	/	/	34.5	10.24	14.65	0.93	0.85
Temperature = 350°C								
BR-FC	16	2.6	4.6	/	/	/	/	/
BR-FCP	/	/	/	25	6.2	4.8	1.56	2.38
BR-FCM	/	/	/	21	2.75	4.37	1.31	1.06

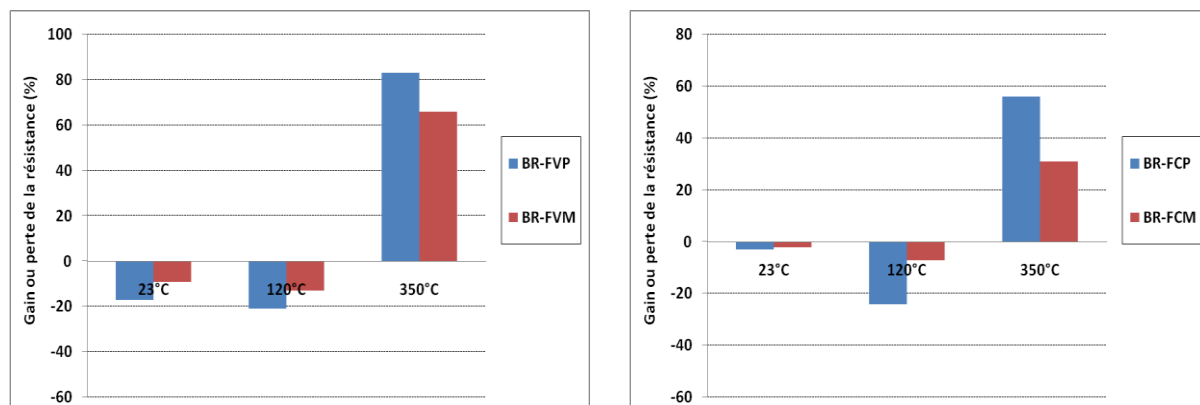


Figure V.30 : Gain ou perte de la résistance de béton confiné protégées en comparaison avec du béton confiné

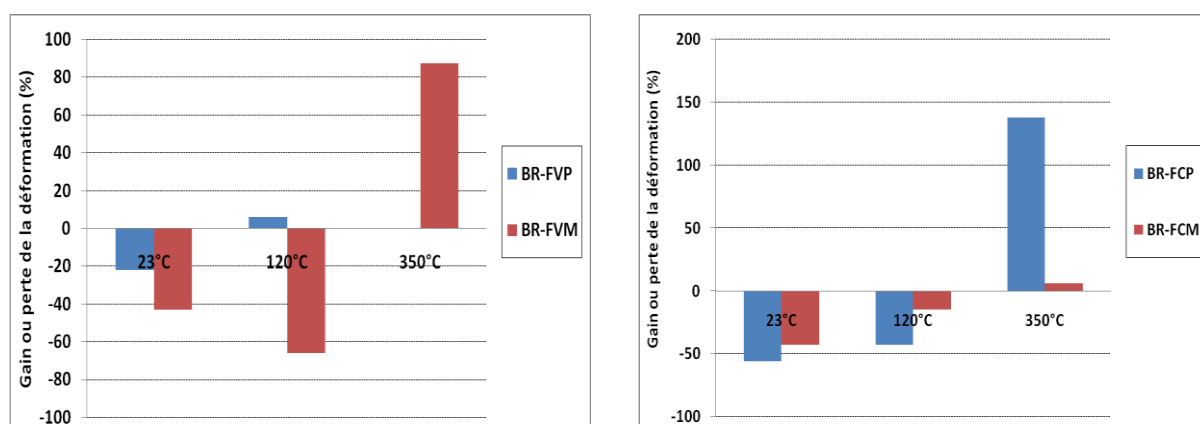


Figure V.31 : Gain ou perte de la ductilité de béton confiné protégées en comparaison avec du béton confiné

La figure suivante présente une Comparaison de la résistance à la compression entre béton confiné protégée

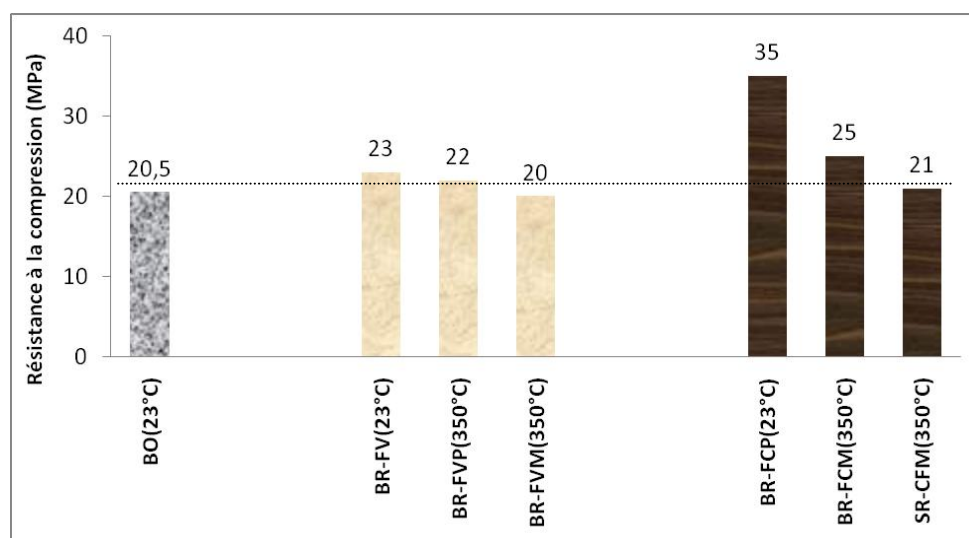


Figure V.32 : Comparaison de la résistance à la compression entre béton confiné protégée soumise à haute température (350 °C), le béton confiné et béton ordinaire à la température ambiante.

L'analyse des résultats expérimentaux des essais de compression obtenus pour l'ensemble confiné des échantillons de béton confinés avec FRP (BR-FV et BR-FC) soumis aux différentes températures et sa comparaison avec le béton confiné par FRP et protégé par une couche de mortier de ciment ou plâtre montre que:

-A partir de la température ambiante jusqu'à 120 °C, une légère diminution de la résistance à la compression et une perte significative de ductilité sont enregistrées pour les échantillons confinés protégés par une couche de plâtre ou de ciment par rapport aux spécimens confinés, la perte de résistance varie entre 2 à 13% dans le cas des échantillons exposés à une température de 23°C et entre 7 à 24% dans le cas des échantillons exposés à 120°C, la perte de déformation atteint les 66%. Cette légère perte de résistance montre l'inefficacité de l'application d'une couche de plâtre ou de mortier dans des conditions normales de température (Température ambiante), ce qui est dû à une mauvaise adhérence entre le composite et la couche de mortier de ciment ou de plâtre en particulier dans le cas des fibres de carbone.

- L'effet de confinement à la température ambiante montre l'efficacité du composite de PRF en tant que renforcement. La résistance des spécimens a été augmentée en moyenne de 70% avec l'application de tissu en fibres de carbone (PRFC) et de 12% avec l'application de tissu en fibres de verre (PRFG).

D'autre part, il est évident que la sécurité structurelle des éléments renforcés non protégés en utilisant les PRF, pourrait être un risque quand ils sont exposés à des incendies. Les essais indiquent que la perte de la résistance des matériaux composites croît avec la température, principalement en raison de la volatilisation du résiné époxy.

La fibre de verre et la fibre de carbone perdent leur effet de renforcement et les colonnes de béton perdent leur capacité structurelle, quand ils sont soumis à une température élevée. Le matériau de liaison (adhésif) se ramollit à des températures proches de  $T_g$  (température de transition vitreuse), ce qui conduit à une réduction significative de la résistance. Une baisse de 48% et 54% a été remarquée à une température de 350°C, pour les spécimens confinés avec FV et FC respectivement.

En ce qui concerne la protection passive, il a été vérifié que sa présence pourrait retarder la dégradation thermique. Les deux bétons confinés protégés ont résulté des performances similaires, cependant, l'efficacité d'une couche de plâtre est plus importante que la couche de mortier de ciment, la protection des éprouvettes de béton confiné par une couche de plâtre ou de mortier de ciment est soumise à une température de 350°C, peut augmenter

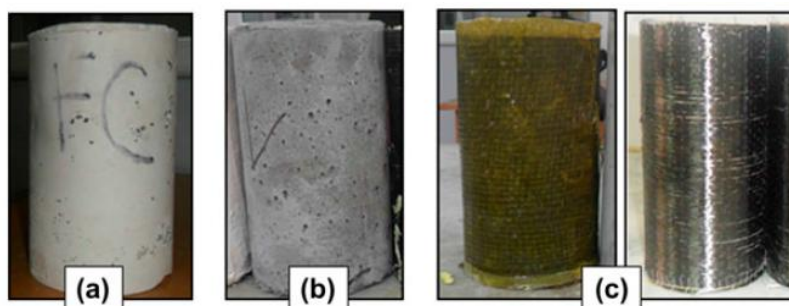
considérablement la résistance et la déformation axiales par rapport aux spécimens confinés non protégés. Pour tous les éprouvettes, les ratios ( $f_{cc}/f_{co}$ ) et ( $\mathcal{E}_{bc}/\mathcal{E}_{bo}$ ) sont toujours significatifs, présentant des valeurs supérieures à un, comme il est indiqué dans les tableaux V.10 et V.11.

En comparant les échantillons confinés protégés et non protégés, l'efficacité de la protection d'une couche de plâtre ou de mortier de ciment est clairement justifiée, lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées (350°C). A cette température, les éprouvettes confinées par des fibres de verre ont un gain de résistance de 83% et 66%, quand ils sont protégés par une couche de plâtre ou de mortier, respectivement. Bien que la protection des spécimens confinés par des fibres de carbone et protégés par une couche de plâtre ou de mortier, augmentent la résistance à la compression de 56% et 31%, respectivement. En ce qui concerne la déformation, nous avons atteint un gain de 138%. On peut dire que, ce système de revêtement permettrait d'améliorer la résistance au feu et la fiabilité des structures en béton armé renforcées par PRF.

Les échantillons de béton qui ont été confinés par fibre de verre et protégés par du plâtre ou mortier, peuvent rattraper leur résistance initiale (à 23°C), quand ils sont soumis à une température de 350°C, tandis que la déformation est améliorée. La différence entre les résistances est négligeable, il est d'environ 4 à 15%. Toutefois, les échantillons de béton, confinés par fibre de carbone et protégés par du plâtre ou mortier de ciment, ne peuvent pas rattraper leur contrainte initiale (à 23°C), quand ils sont soumis à une température de 350°C, ils perdent jusqu'à 32% de leur résistance initiale, mais leurs déformations augmentent. Notez qu'ils ont une meilleure résistance à la compression par rapport aux échantillons de béton ordinaires et béton confiné protégé par fibre de verre.

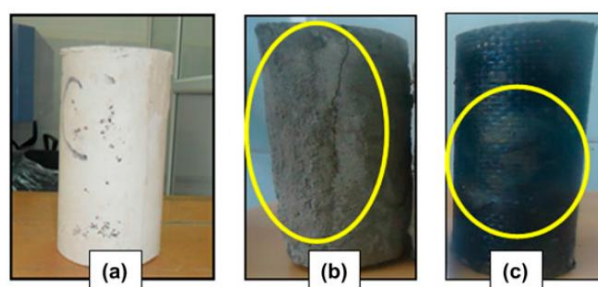
Les figures 33 et 34, montrent l'état des spécimens de béton confiné et confiné protégé avant et après exposition à 350°C pendant 2 heures, respectivement. Les spécimens qui ont été recouvert d'une couche de plâtre semblent être plus intacts, suivi par celui qui ont protégés avec du mortier de ciment. Les résultats obtenus sont confirmés par les conclusions de Rogérios et al [108]. Il est clair que la méthode de protection de béton confiné par une couche de plâtre est plus efficace. La protection des éprouvettes confinées par couche de plâtre est attribuable à leurs propriétés de résistance au feu par rapport au mortier de ciment.

Lors d'un incendie, le plâtre (gypse) libère 18 à 20% de sa teneur en eau. Il a un faible coefficient de conductivité thermique de 0.4 à 0.6 kcal/m.h.C°. Il a une bonne isolation thermique et phonique, donc on peut dire que le plâtre est un matériau incombustible.



a) protégé avec du plâtre, b) protégé avec du mortier de ciment, c) des spécimens de béton confine

**Figure V.33.** Aspect des spécimens de béton avant l'exposition a 350 °C



a) plâtre, b) mortier de ciment, c) béton confine.

**Figure V.34 :** Aspect des échantillons de béton après l'exposition à 350°C pendant 2 heures

#### V.4. Modélisation analytique

La modélisation d'un matériau est un moyen de transcrire son comportement et les lois qui le régissent. Il existe de nombreuses possibilités de modélisation, qu'elle soit analytique, numérique, rhéologique, statistique et autres. Dans cette partie, nous procédons à la confrontation des résultats expérimentaux en utilisant un modèle mathématique.

##### V.4.1. Modèles de résistance pour béton confiné

La plupart des modèles disponibles pour évaluer la résistance à la compression et la ductilité du béton confiné sont basés sur le modèle de confinement dérivé expérimentalement par Richart et al [109-110], qui a été développé pour des cylindres soumis à une pression hydraulique, Ils ont remarqué que la résistance en compression du béton confiné  $f_{bc}$  augmentait en fonction de la pression appliquée. Pour cela, ils ont proposé le modèle suivant :

$$f_{bc} = f_{bo} + K \cdot f_l \quad (1)$$

L'équation (1) devient:

$$\frac{f_{bc}}{f_{bo}} = 1 + K \frac{f_l}{f_{bo}} \quad (2)$$

Où  $f_{bc}$  et  $f_{bo}$  sont la résistance à la compression des bétons confiné et non confiné, respectivement.  $f_l$  est la pression de confinement latéral, et  $K$  c'est le coefficient d'efficacité de confinement. Pour les colonnes de section circulaire, la valeur de la pression de confinement peut être estimée par l'équation suivante [111-112]:

$$f_l = \frac{2 \cdot t_{frp}}{d} f_{frp} \quad (3)$$

Tel que :

$f_{frp}$  : est la résistance à la traction de FRP dans la direction circonférentielle,

$t_{frp}$  : est l'épaisseur de PRF,

$d$  : est le diamètre de la section cylindrique de béton.

Un certain nombre de modèles de résistance ont été proposées spécifiquement pour le béton confiné par PRF, qui emploie l'équation (1) avec des expressions modifiées pour  $K$ , [113-114]. La plupart de ces modèles ont utilisés une valeur constante de  $K$  (entre 2 et 3,5), indiquant que les données expérimentales disponibles dans la littérature montrent une relation linéaire entre la résistance de béton confiné  $f_{bc}$  et la pression de confinement latérale  $f_l$  [115-114]. D'autres chercheurs ont exprimé  $K$  sous forme non linéaire en termes de  $f_l/f_{bo}$  ou  $f_l$  [113-115].

#### **V.4.2. Équation proposée**

Dans ce chapitre, les spécimens ont été confinés protégés avec des matériaux à base des matériaux cimentaires et exposés à différentes températures. Il n'y a pas de modèles proposés dans la littérature pour estimer la résistance des spécimens confinés et protégés. En se basant sur l'analyse des résultats expérimentaux, une équation simple a été proposée afin de prédire la résistance de béton confiné et protégé ( $f_{bc}$ ) avec une couche de plâtre ou d'une couche de mortier de ciment soumis a haute température en relation avec la résistance de béton confine

$$(f_{bc}): \quad \frac{f_{bc}}{f_{bc}} = 1 + K \frac{f_{lp}}{f_{bc}} \quad (4)$$

Ou,  $f_{lp}$  est la pression de confinement latérale appliquée par une couche de plâtre ou de mortier de ciment

La valeur de la pression de confinement est obtenue comme suit:

$$f_{lp} = \frac{2.t}{d} f_t \quad (5)$$

$f_{lp}$  : est la pression de confinement latéral;

$t$  : est l'épaisseur de la couche de plâtre ou de mortier de ciment,

$d$  : est le diamètre de la section cylindrique en béton.

$f_t$  : est la résistance à la traction de plâtre ou de mortier de ciment dans la direction circonférentielle.

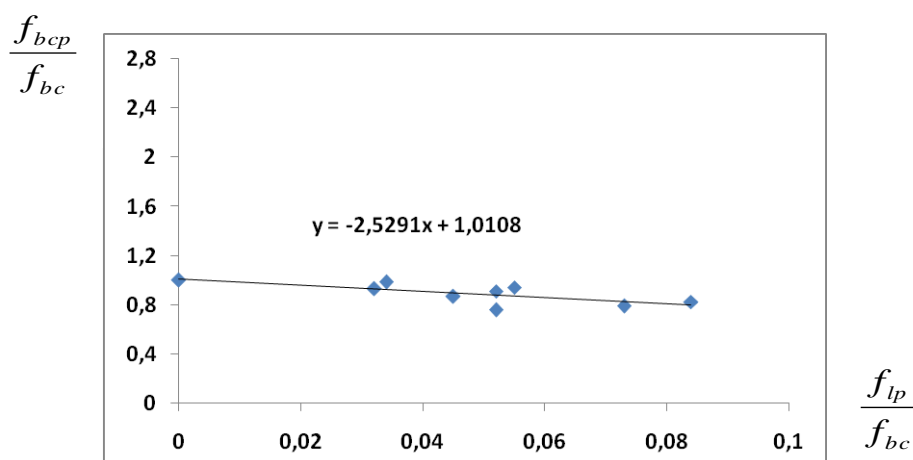
Les figures V.35 et V.36, montrent la relation entre le rapport de la résistance ( $f_{bcp} / f_{bc}$ ) et le rapport de confinement ( $f_{lp} / f_{bc}$ ) des essais expérimentaux, lorsque les échantillons soumis à une température varie entre 23°C à 120°C et à une température de 350°C, respectivement. Une relation linéaire existe. Ces figures indiquent que la résistance ultime du béton confiné protégé par PRF, peut être liée linéairement au ratio de confinement. Basé sur la régression des données d'essai, la résistance de béton confiné à l'aide des PRF et protégé par une couche en matériaux cimentaires est donnée par les expressions suivantes:

- Pour les éprouvettes soumises à une température varie entre 23°C à 120°C :

$$\frac{f_{bcp}}{f_{bc}} = -2.5 \frac{f_{lp}}{f_{bc}} + 1 \quad (6)$$

- Pour les éprouvettes soumises à une température de 350°C:

$$\frac{f_{bcp}}{f_{bc}} = 5.2 \frac{f_{lp}}{f_{bc}} + 1 \quad (7)$$



**Figure V.35 :** Évolution de confinement en fonction de la pression latérale, exposée à une température comprise entre 23°C et 120°C

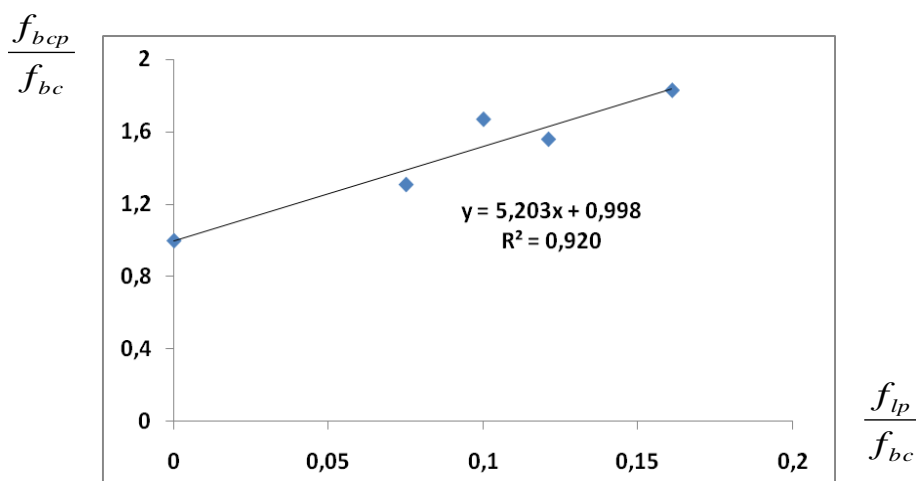


Figure V.36 : Évolution de confinement en fonction de la pression latérale, exposée a une température de 350 °C

La comparaison entre les résultats expérimentaux et analytiques des valeurs de résistance à la compression est indiquée dans le tableau V.12. On peut observer que les valeurs prédites par l'équation (4) sont presque similaires aux résultats expérimentaux; l'écart maximal est d'environ 9%, 15% et 8% pour les échantillons exposés à 23°C, 120°C et 350°C, respectivement.

Tableau V.12 : Comparaison des résultats expérimentaux et analytiques.

Spécimens	$f_{bc}$ MPa	$f_{bc(exp)}$ MPa	K	$f_{bc}$ (Equation (4)) MPa	$(f_{bc} - f_{bc(exp)}) / f_{bc(exp)}$
Temperature = 23°C					
BR-FVP	23	19	-2.5	18.2	-4
BR-FVM		21		19.8	-6
BR-FCP	35	33		30.2	-8
BR-FCM		34.5		31.8	-9
Temperature = 120°C					
BR-FVP	26.5	21	-2.5	21.7	+3
BR-FVM		23		23.2	+1
BR-FCP	37	38		32.2	-15
BR-FCM		34.5		33.7	-2
Temperature = 350°C					
BR-FVP	12	22	5.2	22	0.00
BR-FVM		20		18.8	-6
BR-FCP	16	25		26	+4
BR-FCM		21		22.7	+8



## Conclusion

Ce chapitre a expliqué le comportement de béton confiné par matériaux composites (FV et FC) et protégé par une couche de plâtre ou mortier de ciment, soumis aux différentes températures. Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Le confinement des colonnes en béton par des matériaux composites peuvent augmenter de manière significative la résistance et la déformation axiale, mais avec des degrés différents en fonction des types de matériaux composites. Les spécimens de béton confiné par FC ont montrés un gain de résistance à la compression et la déformation axiale d'environ 70% et 223%, respectivement. Cependant, les échantillons confinés par FV, les gains sont d'environ 12% et 145%, respectivement.

- La fibre de verre et la fibre de carbone perdent leur effet de renforcement et les colonnes de béton perdent leur capacité structurelle, quand ils sont soumis à une température élevée. Le matériau de liaison (adhésif) se ramollit à des températures proches de T<sub>g</sub> (température de transition vitreuse), ce qui conduit à une réduction significative de la résistance. Une baisse de 48% et 54% a été remarqué sur à une température de 350°C pour les spécimens confinés avec FV et FC respectivement.

- La protection de béton confiné par une couche de plâtre ou de mortier de ciment dans les conditions normales de température (Température ambiante) n'est pas efficace et provoque une légère diminution de la résistance à la compression.

- L'efficacité de la protection des spécimens avec une couche de plâtre ou de mortier de ciment est clairement justifiée lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées (350°C). Les échantillons confinés par fibre de verre ont un gain en résistance de 83% et 66%, quand ils sont protégés par une couche de plâtre ou de mortier, respectivement. Bien que la protection des spécimens par une couche de plâtre ou de mortier confiné par fibre de carbone augmente la résistance à la compression de 56% et 31%, respectivement. En ce qui concerne la ductilité, le gain atteint 138%.

- Une bonne corrélation a été obtenue entre les résultats expérimentaux et les équations proposées pour la prédiction de la résistance ultime des colonnes de béton confiné par PRF et protégées par les matériaux cimentaires. Les écarts maximaux étaient 9%, 15% et 8% pour les échantillons exposés à 23 ° C, 120 ° C et 350 ° C, respectivement.

Enfin, on peut dire que, ce système de revêtement permettrait d'améliorer la résistance au feu la sécurité et la fiabilité des structures en béton renforcés à l'aide des PRF.

## Conclusion générale

---

L'utilisation des matériaux composites et les bétons aux nouvelles performances dans la réparation a fait l'objet de ce travail. Ces nouveaux bétons haut de gamme permettent d'atteindre des résistances mécaniques particulièrement élevées (résistance à la compression) ainsi qu'une durabilité exceptionnelle, élargissant encore le domaine d'utilisation du béton. En fait dans le cadre de la réparation, le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux méthodes classiques.

- ❖ Dans notre travail, pour la première partie expérimentale nous avons abordé le procédé de réparation des bétons exposés à une température de 600 C° ; cette température a été choisie à partir de notre recherche bibliographique qui nous a confirmé que l'endommagement du béton commence à partir de 400 à 600 C°, un intervalle de température qui a été confirmé lors des tests d'incendie. D'autre part nous avons varié le temps d'exposition des éprouvettes à cette température d'un pas de 30 minutes pour suivre l'évolution de l'endommagement. Pour notre étude de réparation nous avons jugé que le temps d'exposition de 90 minutes était optimal pour la réparation des bétons. Cette réparation a été appliquée par deux matériaux composites, le premier en fibre de verre, le deuxième en fibre de carbone.

La récolte des résultats nous a permis de déceler plusieurs tendances que nous allons les citer ci-dessous :

-la détérioration de la résistance due à l'exposition du béton à la température 600 C° suit une droite de régression comme suit :

$$f_{c28} = - 0.212 \times T + 26.137$$

- la détérioration complète des éprouvettes exposées pendant 120 minutes confirme la tendance de l'équation précédente.

- Cas de réparation en fibre de verre :
  - gain de résistance de 283 % par rapport au béton détérioré.
  - perte de résistance de 19 % par rapport au béton non endommagé.
  
- Cas de réparation en fibre de carbone :
  - gain de résistance de 412 % par rapport au béton détérioré.
  - gain de résistance de 33 % par rapport au béton non endommagé.
- La ductilité des spécimens augmente lorsque le béton est réparé par fibre de carbone et fibre de verre par rapport le béton témoin (non réparé).

Finalement, nous pouvons conclure que l'option optimale pour la réparation des bétons endommagés est l'utilisation du matériau en fibre de carbone.

❖ Dans la deuxième Partie expérimentale nous avons expliquée le comportement des bétons à colonnes confinés par des matériaux composites (PRFV et PRFC) et protégés par une couche de plâtre ou de ciment mortier, soumis à des températures différentes. Sur la base des résultats expérimentaux examinés dans le document, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Le confinement des colonnes en béton par des matériaux composites peuvent augmenter de manière significative la charge de rupture et la contrainte axiale, mais avec des degrés différents en fonction des types de matériaux composites. Cylindres béton confiné par fibre de carbone (PRFV) ont montré un gain de résistance à la compression et la déformation axiale d'environ 70% et 223%, respectivement. Cependant, les échantillons confinés par fibre de verre (PRFV), les gains sont d'environ 12% et 145%, respectivement.
- Le PRFV et PRFC perdent leur effet de renforcement et les colonnes de béton perdent leur capacité structurelle, quand ils sont soumis à une température élevée. Le matériau de liaison (adhésif) se ramollit à des températures proches de T<sub>g</sub> (température de transition vitreuse), ce qui conduit à une réduction significative de la résistance. Une baisse de 48% et 54% a été remarqué sur le seuil de 350 °C pour les spécimens confinés avec PRFV et PRFC respectivement.
- L'utilisation d'une couche de plâtre ou de mortier de ciment sur béton confiné dans des conditions normales de température n'est pas efficace et provoque une légère diminution de la résistance à la compression.
- L'efficacité de la protection de spécimens d'une couche de plâtre ou de mortier de ciment est clairement justifiée lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées (350 °C). Les

échantillons confinés par PRFV ont un gain en puissance de 83% et 66%, quand ils sont protégés par une couche de plâtre ou de mortier, respectivement. Bien que la protection de spécimens par une couche de plâtre ou de mortier confiné par PRFC augmente la résistance à la compression de 56% et 31%, respectivement. En ce qui concerne la ductilité, le gain atteint jusqu'à 138%.

- Une bonne corrélation a été obtenue entre les résultats expérimentaux et les équations proposées pour la prédiction de la résistance ultime des colonnes de béton de PRF confiné protégées. Les écarts maximaux étaient de 9%, 15% et 8% pour les échantillons exposés à 23 °C, 120 °C et 350 °C, respectivement.

Enfin, on peut dire que, ce système de revêtement permettrait d'améliorer la résistance au feu de la PRF, la sécurité et la fiabilité des PRF structures en béton armé.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

- [01] LUDOVIC MISSEMER(2011)" Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances", THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE: application au BCV®
- [02] MENOUE ABDELLAH (2004) " Étude du comportement thermique mécaniques des bétons a haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, THESE Pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L' UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR
- [03] NOUMOWE A.N. (1995), "Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances", Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon.
- [04] TOUMI BELKACEM "Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton" Présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat En science Génie Civil Université Mentouri Constantine.
- [05] HANICHE R (2011), "Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement" Pour obtenir Le grade de docteur L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
- [06] KANEMA, T. M. (2007)" Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", Thèse de l'Université de Cergy-Pontoise.
- [07] ZHANG B. (2011) "Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures". Fire Safety Journal.
- [08] TEBBAL N. RAHMOUNI Z. BELOUADAH M. Influence d'un ajout sur le comportement mécanique des bétons à haute performance soumis à des températures élevées, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, (6 au 8 juin 2012)
- [09] DTU (1987),"Comportement au feu des structures en béton", Règles FB, Feu et Béton. 42p
- [10] EUROCODE 4 (1994), "Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton" , Paris, AFNOR, 204 p.
- [11] ULM, F.-J., ACKER P., et LEVY M. "The "Chunnel" fire, II: Analysis of Concrete Damage." Journal of Engineering Mechanics. Vol. 125, n° 3, pp. 283-289. 1999.
- [12] FERON C, AUTUORI P.et JOYEUX D. "Vers des moyens de prévenir l'écaillage du béton en tunnel." Tunnels et ouvrages souterrains, Vol. 196, pp. 228-235, 2006.
- [13] BERNARD M. LEVY P, VEYRON L. "Comportement du béton dans les incendies de tunnels." Tunnels et Ouvrages Souterrains, Vol. 203, pp. 301-308, 2007.
- [14] MENENDEZ E., VEGA L. "analysis of the behaviour of the structural concrete after the fire at the Windsor Building in Madrid". Fire and Materials, vol. 34, p95-107. 2010.
- [15] KHOURY G, A., ANDERBERG Y., "Concrete Spalling Review "Fire Safety Design, 2000
- [16] BAZANT Z.P. ", Analysis of pore pressure, thermal stresses and fracture in rapidly heated concrete". International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, NIST, pp. 155-164, 1997.

- [17] HERTZ K. D. "Limits of spalling of fire exposed concrete". Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 103 – 116, 2003
- [18] HERTZ K.D. and SORENSEN L.S. "Test method for spalling of fire exposed Concrete, "Fire Safety Journal, Vol. 40, pp. 466–476, 2005 .
- [19] MORAIS M., PLIYA P., NOUMOWE A., BEAUCOUR A. L., ORTOLA S. "Contribution to the explanation of the spalling of small specimen without any mechanical restraint exposed to high temperature". Nuclear Engineering and Design Vol. 240, pp. 2655–2663, 2010.
- [20] MENENDEZ E., VEGA L. "analysis of the behaviour of the structural concrete after the fire at the Windsor Building in Madrid". Fire and Materials, vol. 34, p. 95-107. 2010.
- [21] ACI Cornmittee."Causes,Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures". (1984) ACI-journal, Mai-Juin, pp. 211-230.
- [22] DESBIENS V, "restauration de la stabilité et de la rigidité des ouvrages en béton par la méthode de l'injection", thèse de L'EST université du Québec pp 3-4-15-16-19-20-22-23-24.
- [23] Guide complément PPRT technique relatif a l'effet de surpression," Recommandations et précautions en vue de réduire les risques", pp 77-78
- [24] AFGC, Documents scientifiques et techniques "Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion" pp 39-40-41
- [25] RESSE C. et VENAUT M., "Projection des mortiers béton et plâtres, Techniques et applications bâtiment et TP", 1981
- [26] ROCHDI El Houssain , "contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites", thèse de l'université Claude Bernard - Lyon 1 pp16-17
- [27] HAMELIN P., "Composite infrastructure applications: concept, design, and durability control and prediction", Journal of Composites Technology and Research, ASTM, 1998.
- [28] PIERRE ALEXANDRE BRIEMEL, «simulation numérique de renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétal et comparaison au renforcement par des fibres de carbone».
- [29] <http://www.st-ds.net/beton/info/lois-comportement-beton-acier.html>  
[SIK\_06] SIKA FRANCE S. A. Notice technique sikadur 330 [en ligne]. Disponible sur: <http://www.sika.fr/construction/document/nt/nt997.pdf> [consulté le 03.01.2006].
- [30] LAURA LAURENZIS «A comparative study of models on confinement of concrete cylinders with FRP composites». s.l.: Chalmers, June 2001.
- [31] TAOUCHE F, HANNACHI N, AIT TAHAR K, «influence du type de renfort sur la pression latérale de confinement»,UniversitéMouloud Mammeri de Tizi ousou – Algérie.
- [32] RICHARD MARANDA., " Analyse par éléments finis de poteaux mixtes avec section d'acier en I de classe 4". Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise en sciences appliquées (génie civil), école polytechnique de Montréal, décembre 1998.
- [33] GHERNOUTI. Y, «conception et analyse mécanique de confinement des éléments cylindriques du béton à renfort mixte», thèse doctorat, UMBB. F.S.I. 2009.

- [34] RICHART F.E., BRANDTZAEG A et BROWN R.L., "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses". University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Bulletin no 185, 104 p. 1928.
- [35] MASTER BUILDERS, Inc. and Structural Preservation Systems. (1998) "M Brace Composite Strengthening System: Engineering Design Guidelines", 2nd edition. Cleveland, OH: Master Builders, Inc
- [36] DANIEL MONGEAU., "Effet des étriers à haute limite élastique sur le comportement des poteaux en béton à haute performance". Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, spécialité : génie civil, université de Sherbrooke, août 1996.
- [37] FAM A. Z et RIZKALLA S. H., "Behavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes". ACI structural Journal, Vol. 98, No. 3, pp 280-289. 2001.
- [38] PARK R et PAULAY T., "Reinforced Concrete Structures", John Wiley and Sons, New York, N.Y, 21-23 pp. 1975.
- [39] PRIMIS G., FERRIER E., HAMELIN P. (2009) – Effect of external FRP retrofitting on reinforced concrete short columns for seismic strengthening – Composite Structures, Vol.88, p. 367 – 379.
- [40] TASTANI S.P., PANTAZOPOULOU S.J. (2008) – Detailing procedures for seismic rehabilitation of reinforced concrete members with fiber reinforced polymers – Engineering Structure, Vol. 30, p. 450 – 461.
- [41] PARVIN A., Jamwal A.S. (2005) - Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders. – Composite Structure, Vol.67, p. 437 – 442.
- [42] LAU K-T., L-M. ZHOU (2001) – The mechanical behaviour of composite-wrapped concrete cylinders subjected to uniaxial compression load – Composite Structures, Vol.52, p. 189 – 198.
- [43] Li G., KIDANE S., PANG S-S., HELMS J.E., Stubblefield M.A. (2003a) – Investigation into repaired RC columns – Composite Structures,.
- [44] SHRIVE P.L., AZAMEDJIAD A., TARDOS G., MCWHINNIE C. and SHRIVE N.G. (2003) - Strengthening of concrete columns with carbon fibre reinforced polymer wrap. – Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 30, p.543-553.
- [45] ROCHETTE P, LABOSSIERE P. (2000) - Axial testing of rectangular column models confined with composites – Journal of Composite Construction, ASCE, Vol. 4, Issue 3, p.129–136.
- [46] DAUDEY X., "évaluation et renforcement sismique de piles de pont en béton armé" conçues selon les prescriptions prévalant avant 1971 pp 94-95-96
- [47] PHILIPPE DUQUETIE, "Renforcement en flexion des poutres en béton armé à l'aide de plaque en matériaux composites réalisées in situ", février 1998.
- [48] GREEN M.F., BISBY L.A., FAM A.Z., KODUR V.K.R. (2006) – FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions - Cement and Concrete Research, Vol. 28, p. 928-937.

- [49] BELARBI A., BAE S-W. (2007) – An experimental study on the effect of environmental exposures and corrosion on RC columns with FRP composite jakets – Composites - Part B: Engineering, Vol. 38, p. 674 – 684.
- [50] ARY Arya C., CLARKE J.L., KAY E.A., O'REGAN P.D. (2002) – TR 55: Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials; a review- Engineering Structures, Vol. 24, p. 889-900.
- [51] MICHEL LE BLANC, Confinement de colonnes de béton circulaire a l'aide de fibre de carbone, septembre 2000.
- [52] EHSANI, MR (1993) Glass\_fiber reinforcing barr, inaltinative materiels for the reinforcement and perstressing of concret, edited by J.L CLARKE , glasgow, UK, Blackiie academic and professional, pp.35-54.
- [53] PHILPPE DUQUETIE, Renforcement en flexion des poutres en béton armé à l'aide de plaque en matériaux composites réalisées in situ, février 1998.
- [54]- CHRETIEN G, Matériaux composites a matrices organique, édition Lavosier, 1996.
- [55] BERTHELOT .J. M. Matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures .Edition technique et documentation 1999.
- [56] TANIA CROSTON, Etude expérimental du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 point réparée par matériaux composites (Approche probabiliste), Juin 2006.
- [57] ELHOUSSAIN Rochdi, contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalle en béton armé renforcé par matériaux composites, Décembre 2004.
- [58] ERIC BEAUMIER, Evaluation sous charge statique de glissières de pont de type PL2 et PL3 en béton renforcé avec de l'armature en matériaux composite, mars 2000.
- [59] HARRIS B.; “Fatigue in composites: science and technology of the fatigue response of fiber-reinforced plastics”, edition B. Harris, University of Bath, UK, 1983.
- [60] BALEY C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Technique de l'ingénieur 2005, N 2220, 12p.
- [61] MAYA JACOB JOHN; RAJESH D.; ANANDJIWALA, 2008; Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites; Polymer composites, 187-207.
- [62] NEVELL TP.; ZERONIAN SH. Cellulose chemistry and its applications edited by T.; Nevell P.; and Zeronian S. H.; Ellis Horwood; Chichester, 1985.
- [63] SADOV F.; KORCHAGIN M.; MATEESKY A. and al. Chemical technology of fibrous materials 1978.
- [64] AIT AMEUR, M.M., Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales?.Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.
- [65] BOUCHEKOUK, M., ? Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymère thermoplastiques ? thèse doctorat, INSA de Lyon, France,1992.



- [66] HOUGET, V., Etude des caractéristiques mécaniques et physicochimiques de composites ciments fibres organiques?, thèse de doctorat, INSA, Lyon, France, 1992.
- [67] KHENFER M. Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques. Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.
- [68] KRIKER. A, Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec ?. Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2005.
- [69] LACROIX R, FUENTES A. et THONIER, H., ? Traité de béton armé ? Édition EYROLLES Paris, 1982
- [70] KRISCHER O, KROLL. K, Technique du séchage, traduction CETIAT, 1978
- [71] KHAN. M.I, Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models, Building and Environment, Vol.37, pp607-614, 2002
- [72] PILAKOUTASK HE JH AND WALDRONP. CRFP plate strenthening of Rc beams. International conference on structural faults et repair edinburgh. pp.119\_127, 1997.
- [73] PINZELLIR. Kevlar aramid faber for external streng thening etrepair of concrete structures. International confarence on structural faults et repair. London, 1999.
- [74] TUMIALONG, NANNI, BELLT AND FUKUYAMA. FRP composite for streng civil infrastructure a round the world. SAMP journal, vol.38, n 5, pp.9\_15. September/October 2002.
- [75] BERTHELOT. J.M, FERRIER E, HAMLIN. P, Compressive behaviour of concrete externally confined by composite jackets. Part B: modling. Construction and building matrials 20, pp.338\_347, 2006.
- [76] TOUTQNNJI HA. Stress\_strain characteristics of concrete columns confined with advanced fiber composite sheet., ACI. Mater J, p404, May \_ June, 1999.
- [77] SAAMAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Model of concrete confined by fiber composites. Journal of structure and Enineering , p1025, September 1998.
- [78] KARBHARI VM. Composite jacket concrete under uniaxial compression verification of simple design equation. J Mater civil Eng, pp.185\_93, 1997.
- [79] AVRIL S, VAUTRIN A , HAMLIN P et Surel Y. local and global anlysis of cracked reinforced concrete Beam repaired with CFRP Laminates. In proceeding of ECCM10 Brugge, Belgium. 2002.
- [80] DREUX. G, and FESTA. J, Nouveau guide du be´ton et de ses constituants. Eyrolles, 8e`me Edition, Paris, 1998.
- [81] GHERNOUTI .Y, ALEX Li and RABEHI. B, Effectiveness of repair on damaged concrete columns by using fiber-reinforced polymer composite and increasing concrete section. J Reinf Plast Compos. 2012; 31(23): 1616–1629.
- [82] BENZAID. R, MESBAH. H, CHEIKH. N, FRP-confined Concrete Cylinders: Axial Compression Experiments and Strength Model. J Reinf Plast Compos. 2010; 29(16): 2469-2488.

- [83] RABEHI. B, GHERNOUTI. Y, ALEX Li and BOUMCHEDDA. K. "Comparative behavior under compression of concrete columns repaired by fiber reinforced polymer (FRP) jacketing and ultra highperformance fiber reinforced concrete (UHPFRC)" *Journal of Adhesion Science and Technology*. Vol 28, N° 22–23, 2327–2346. (2014). <http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2014.966885>. (ISSN: 0169-4243)
- [84] KANEMA. T.M. (2007)" Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons", Thèse de l'Université de Cergy-Pontoise.
- [85] ZHANG. B. (2011), "Effects of moisture evaporation (weight loss) on fracture properties of high performance concrete subjected to high temperatures". *Fire Safety Journal*.
- [86] BLONTROCK. H, TAERWE L, MATTHYS. S, Properties of Fibre Reinforced Plastics at Elevated Temperatures with Regard to Fire Resistance of Reinforced Concrete Members. In: *Proceedings, 4<sup>th</sup> International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, Baltimore, MD. 1999; 43–54.
- [87] ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI 440.2R- 02, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. 2004; pp. 3.
- [88] WILLIAMS. B, BISBY. L, KODUR. V, GREEN. M, CHOWDHURY. E, Fire Insulation Schemes for FRP-Strengthened Concrete Slabs. *Composites Part A*, Vol. 37, 2005, pp. 1151-1160.
- [89] MIRMIRAN. A, SHAHAWY. M, SAMAAN. M, EL ECHARY. H, MASTRAPA. J.C, PICO. O, Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete. *Journal of Composites for Construction*. 1998; 2(4): 175–185.
- [90] BENZAID. R, MESBAH. H, CHEIKH. N, FRP-confined Concrete Cylinders: Axial Compression Experiments and Strength Model. *J Reinf Plast Compos*. 2010; 29(16): 2469-2488.
- [91] DOUGLAS B. CLEARY, CHRISTOPHER D. CASSINO AND ROSIE TORTORICE, Effect of Elevated Temperatures on a Fibre Composite Use to Strengthen Concrete Columns, *Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, Vol. 20, No.( 05/2002)
- [92] ROGERIO. C.A, de Lima, Luiz Carlos P. da Silva Filho, João L. Campagnolo, Behaviour of CFRP Composites Exposed to High Temperature *University of Brazil at Rio Grande do Sul - UFRG (2003)*
- [93] MARK. F, GREEN. A, LUKE. A, BISBY. A, AMIR. Z, VENKATESH K.R. Kodur FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions, Ottawa, Canada Available online (18 September 2006)
- [94] KATY BRANTHWAITE, A Finite Element Analysis of the Fire Resistance of FRP Reinforced Concrete Members, : katy\_b\_07@hotmail.com School of Civil Engineering, Faculty of Engineering (2007)
- [95] YOUSEF. A, AL-SALLOUMA. A, HUSSEIN. M, ELSANADEDY B, AREF. A, ABADDEL. A, Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure, *journal homepage Construction and Building Materials* (2009).
- [96] ERSHAD ULLAH CHOWDHURY, BEHAVIOUR of fibre reinforced polymer confined reinforced concrete columns under fire condition N ,Kingston, Ontario, Canada December, 2009

- [97] BENICHOUE. N, KODUR K.R, GREEN M.F, et BISBY L.A, Résistance au feu des systèmes renforcés de PRF utilisés pour la réparation des bâtiments en béton. Conseil national de recherches du Canada Août ( 2010 ) ISSN 1206-1239.
- [98] MARÉCHAL , JC. (1972b), "Thermal conductivity and thermal expansion coefficients of concrete as a function of temperature and humidity". In International Seminar on Concrete for Nuclear Reactors. ACI Special Publication No.34, Vol. 2, Paper SP34-49, American Concrete Institute, Detroit, pp. 1047-57
- [99] FAURY. J. P. (1958). Le béton. 3rd éd. Paris: Dunod.
- [100] WANG. K, YOUNG. B, SMITH. S, An experimental study on the mechanical properties of pultruded CFRP plates at elevated temperatures. Structures Congress ASCE. 2011; 3110-3119.
- [101] ARIBI. C, BEZZAZI. B, MIR. A, Experimental Study for the Choice of a Matrix Epoxy Resin for the Elaboration of Laminates. Key Engineering Materials.2013; 550:17- 24.
- [102] XIAO. Y, WU. H, Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets. J Reinf Plast Compos 2003; 22(13): 1187–1201.
- [103] SAMAAAN. M, MIRMIRAN. A, SHAHAWY. M, Model of concrete confined by fiber composites. J Struct Eng ACSE 1998; 124(9): 1025–1031.
- [104] FRESKAKIS. G.N, BURROW. R.C, DEBBAS E.B. Strength properties of concrete at elevated temperature. Civil engineering nuclear power, ASCE national convention. Boston (USA): American Soc. of Civil Eng. 1979.
- [105] BORCHERT. K, ZILCH. K. Time depending thermo mechanical bond behavior of epoxy bonded pre-stressed FRP-reinforcement. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> international symposium on fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS7). 2005; 671–84.
- [106] XIAO. Y, WU. H, Compressive behavior of confined concrete by carbon fiber composite jackets". J Mater Civ Eng. 2000; 12(2): 139–146.
- [107] RABEHI. B, GHERNOUTI. Y, ALEX LI and BOUMCHEDA. K, Comparative behavior under compression of concrete columns repaired by fiber reinforced polymer (FRP) jacketing and ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). Journal of Adhesion Science and Technology. 2014; 28(22-23): 2327-2346.
- [108] ROGERIOS. C.A, de Lima, Luiz Carlos P. da Silva Filho, João L. Campagnolo. Behaviour of CFRP Composites Exposed to High Temperature. Engenharia Civil. UM. 2003;17: 69-81.
- [109] RICHART F.E, BRANDTZAEG. A, BROWN. R.L. The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression. Bulletin No. 190, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, USA; 1929.
- [110] RICHART F.E, BRANDTZAEG. A, BROWN. R.L. "*The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression*". Engineering Experimental Station Bulletin No- 190, University of Illinious, 74 pp. Urbana, 1929.
- [111] KUMUTHA. R, VAIDYANATHAN. R, PALANICHAMY. M.S, Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Columns Strengthened Using GFRP., Cement & Concrete Composites. 2007; 29: 609–615.

- [112] TOUTANJI. H, Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets. *ACI Mater. J.* 1999; 96(3): 397-404.
- [113] MATTHYS. S, TOUTANJI. H, AUDENAERT. K, TAERWE. L. Axial Load Behavior of Large-scale Columns Confined with Fiber-reinforced Polymer Composites, *ACI Struct. J.* 2005; 102(2): 258-267.
- [114] THERIAULT. M, NEALE. K.W. Design Equations for Axially-loaded Reinforced Concrete Columns Strengthened with FRP Wraps. *Can.*
- [115] JIANG. T, TENG. J.G, Analysis-oriented Stress-Strain Models for FRP-Confined Concrete, *Eng. Struct.* 2007; 29: 2968-2986.