

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Frères Mentouri Constantine 1



Faculté des Sciences de la Technologie  
Département de Génie Civil

N° d'ordre :  
Série :

# **THESE**

Pour l'obtention du Diplôme de Doctorat LMD en Génie Civil  
Option : Matériaux

## **Titre**

---

---

# **Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés**

---

---

Présentée par : **MIHOUB Imane**

Dirigée par : **Pr. Mohammed-Rissel KHELIFA**

Soutenue le 04 / 02 / 2021

### **Devant le Jury**

Pr Beroual Ahmed	Université des Frères Mentouri - Constantine 1	Président
Pr Khelifa Mohammed-Rissel	Université Batna 2	Rapporteur
Pr Boudaoud Zeineddine	Université Larbi Ben M'hidi - Oum El-Bouaghi	Examinateur
Pr Benouis Abdelhalim	Université du 8 Mai 1945 - Guelma	Examinateur
Dr Abdou Kamel	Université des Frères Mentouri - Constantine 1	Examinateur
Dr Bensebti Salah-Eddine	Université des Frères Mentouri - Constantine 1	Examinateur
Pr Guetteche Mohamed Nacer	Université des Frères Mentouri - Constantine 1	Invité

# Dédicaces

*Je dédie cette thèse :*

*A ma très chère mère Khamssa qui n'a pas cessé de m'encourager, de me soutenir moralement et financièrement et de prier pour moi,*

*A la mémoire de mon père Abd-Elmadjid et la mémoire de ma grand-mère que je n'oublierai jamais, que Dieu ait leurs âmes.*

*A mes frères et mes sœurs ainsi qu'à tous les membres de ma famille, petits et grands, pour leur soutien, leur affection et leurs encouragements,*

*A tous mes amis et mes collègues.*

## Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
اللهم صل على محمد و على آل محمد كما صليت على إبراهيم و على آل إبراهيم وبارك على محمد و على آل محمد كما باركت على إبراهيم و على آل إبراهيم في العالمين انك حميد مجيد

*J'adresse mes remerciements à toute ma famille et particulièrement ma très chère mère qui m'a encouragé et m'a toujours soutenu.*

*Je voudrais remercier mon directeur de thèse, KHELIFA Mohammed-Rissel, Professeur au département de génie civil à l'université Batna2, pour toute son aide, sa disponibilité et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodiguée. Je le remercie pour sa confiance, pour m'avoir guidé, conseillé, et supporté durant toute la période de la préparation de ma thèse.*

*Je tiens à remercier Professeur BEROUAL Ahmed du département de génie civil de l'université Mentouri Constantine 1, d'avoir accepté de présider mon jury de thèse et de m'avoir aidé dans toutes mes démarches administratives.*

*J'adresse tous mes remerciements au Professeur BOUDAOU Zeineddine, de l'université d'Oum El Bouaghi, Professeur BENOUIS Abdelhalim de l'université de Guelma, Professeur GUETTECHE Mohammed-Nacer de l'université des Frères Mentouri Constantine 1 et Dr. BENSEBTI Salah-Eddine, Maitre de Conférence « A » de l'université des Frères Mentouri Constantine 1, d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Un grand merci à Dr. ABDOU Kamel, Maitre de conférences « A » et Chef du département de génie civil de l'université Mentouri Constantine 1, qui a accepté d'expertiser mon travail de thèse. Je le remercie également pour son aide précieuse et pour sa disponibilité tout le long de mon cursus scolaire au département de génie civil, il a mis tous les moyens disponibles à notre disposition, nous les doctorants, pour que nous puissions avancer dans nos travaux de recherche.*

*Je remercie vivement Dr. MEZHOUD Samy, Maitre de Conférence « A » et Chef du département des sciences géographiques et de topographie de l'université Mentouri Constantine 1, pour toutes son aide et ses conseils précieux au cours de la rédaction de mon article.*

*Je tiens à remercier toutes les personnes, qui ont apporté une contribution directe ou indirecte à l'aboutissement de ma thèse, plus particulièrement les membres du laboratoire matériaux de construction de l'université des Frères Mentouri Constantine 1 qui m'ont aidé et soutenu durant la réalisation de mes travaux de recherches.*

*Un grand merci à tous mes amis de l'université des Frères Mentouri Constantine 1, particulièrement ma très chère amie Rima qui a été présente tant sur le plan professionnel que sur le plan moral, merci pour son amitié et ses encouragements.*

*Imane MIHOUB*

## Résumé

Les recherches sur les bétons renforcés de fibres se sont considérablement développées ces dernières années. Elles s'intéressent de plus en plus au renforcement des bétons de structure par des fibres végétales non traitées. L'incorporation des fibres dans le béton vise à améliorer les performances mécaniques du béton comme la résistance à la traction et la limitation de la fissuration. L'utilisation des fibres naturelles pourrait être une alternative à moindre impact environnemental et économique comparée aux fibres synthétiques fabriquées à partir des dérivées du pétrole.

L'objectif de notre travail de recherche est l'étude le comportement des bétons renforcés de fibres, plus particulièrement par des fibres naturelles, face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatique externe comparativement à des bétons renforcés par des fibres synthétiques. Deux différentes longueur de fibres ont été étudiées (20 et 30 mm).

Cinq types de bétons ont été confectionnés, deux types de béton renforcé avec 1% en volume de fibres d'alfa avec les deux longueurs (AC-20 et AC-30), deux bétons renforcés avec 0.22% en volume de fibres de polypropylène avec les deux longueurs (PC-20 et PC-30) et un béton ordinaire pris comme béton témoin (OC).

Des échantillons des différents bétons confectionnés ont été exposés à des cycles de chauffage/ refroidissement de la température ambiante à une température de consigne de 180, 380 et 600°C, d'autres échantillons (7x7x7 cm) ont été immergés dans une solution dosée à 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pendant 12 mois.

Les résultats ont montré que les fibres d'alfa peuvent remplacer les fibres de polypropylène dans le renforcement des bétons en améliorant leur comportement face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatique externe et en ayant un meilleurs impact sur l'environnement.

**Mots-clés :** Fibres, alfa, polypropylène, béton, durabilité, haute température.

## Abstract

Research on fiber-reinforced concrete has developed considerably in recent years. They are increasingly interested in reinforcing structural concrete with untreated vegetal fiber. The incorporation of fibers into concrete is intended to improve the mechanical performance of concrete such as tensile strength and cracking limitation. The use of natural fibers could be an alternative with lower environmental and economic impact compared to synthetic fibers made from petroleum derivatives.

The objective of our research is the study of the behavior of fiber-reinforced concrete, more particularly with vegetal fiber, in the face of temperature rise and their durability in the face of external sulphate attack compared to synthetic fibers-reinforced concrete. Two different fiber lengths were studied (20 and 30 mm).

Five types of concrete were made, two types of concrete reinforced with 1% by volume of alfa fibers with the two lengths (AC-20 and AC-30), two concrete reinforced with 0.22 % by volume of polypropylene fibers with the two lengths (PC-20 and PC-30) and ordinary concrete taken as control concrete (OC).

The concrete samples produced were exposed to heating / cooling cycles from room temperature to a set temperature of 180, 380 and 600 °C, other samples (7x7x7 cm) were immersed in a solution dosed at 5% Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> for 12 months.

The results showed that alfa fibers can replace polypropylene fibers in the reinforcement of concrete by improving their behavior in the face of temperature rise and their durability in the face of external sulphate attack and having a better impact on the environment.

**Key words:** Fibres, alfa, polypropylene, concrete, durability, high temperature.

## ملخص

تطورت الأبحاث حول الخرسانة المدعمة بالألياف بشكل كبير في السنوات الأخيرة، وقد أصبحت تهتم بشكل متزايد بتعزيز الخرسانة بألياف نباتية غير معالجة. يهدف دمج الألياف في الخرسانة إلى تحسين الأداء الميكانيكي للخرسانة مثل مقاومة الشد والحد من التشقق. يمكن أن يكون استخدام الألياف الطبيعية بديلاً مع تأثير بيئي واقتصادي أقل مقارنة بالألياف التركيبية المصنوعة من المشتقات البترولية.

الهدف من بحثنا هو دراسة سلوك الخرسانة المدعمة بالألياف ، وخاصة الألياف النباتية ، في مواجهة ارتفاع درجة الحرارة و متانتها لمواجهة هجوم الكبريتات الخارجية مقارنة بالخرسانة المدعمة بالألياف التركيبية. تمت دراسة طولين مختلفين من الألياف (20 و 30 مم).

تمت صياغة خمسة أنواع من الخرسانة ، نوعان من الخرسانة المدعمة بنسبة 1٪ من حجم ألياف الحلفاء بطولين (AC-20 و AC-30) ، واثنان من الخرسانة المدعمة بنسبة 0.22٪ من حجم ألياف البولي بروبيلين بطولين (PC-20 و PC-30) و خرسانة عادية (OC) تؤخذ كخرسانة مرجعية .

تم تعريض عينات الخرسانة المنتجة لدورات تسخين / تبريد من درجة حرارة الغرفة إلى درجة حرارة محددة تبلغ 180 و 380 و 600 درجة مئوية، وتم غمر عينات أخرى (7 × 7 × 7 سم) في محلول مضاف إليه 5٪ Na<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> لمدة 12 شهرًا.

أظهرت النتائج أن ألياف الحلفاء (Alfa) يمكن أن تحل محل ألياف البولي بروبيلين في تقوية الخرسانة ، مما يحسن من سلوكها في مواجهة ارتفاع درجة الحرارة و متانتها ضد هجوم الكبريتات الخارجية ويكون لها تأثير أفضل على البيئة.

**الكلمات المفتاحية:** ألياف ، الحلفاء ، بولي بروبيلين ، خرسانة ، الديمومة، درجة حرارة عالية.

## Table des matières

Résumé.....	.....
ملخص.....	.....
Liste des figures .....	.....
Liste des tableaux.....	.....
Liste des notations.....	.....
Introduction générale .....	.....
Introduction générale .....	2
1. Généralités et problématique .....	2
2. Objectif de la recherche .....	2
3. L'organisation de la thèse .....	3
Chapitre 1 : Etude bibliographique .....	5
1.1 Généralités sur le béton.....	5
1.1.1. Le béton .....	5
1.1.2. La pâte de ciment .....	5
1.1.2.1. Porosité de la pâte de ciment : .....	6
1.1.2.2. L'eau dans la pâte de ciment : .....	7
1.1.3. Les granulats : .....	7
1.2 Caractérisation du béton à l'état frais .....	8
1.3 Caractérisation du béton à l'état durci .....	9
1.4 Différents types de bétons.....	11
1.5 Renforcement des bétons par des fibres.....	12
1.5.2. Les principales fibres utilisées dans le béton .....	12
1.5.3. Les fibres végétales.....	13
1.5.3.1. Fibres d'alfa ( <i>Stipa Tenacissima L</i> ) .....	15
1.5.4. L'effet des fibres sur le comportement du béton .....	17
1.5.4.1. Sur l'ouvrabilité .....	17
1.5.4.2. Sur les performances mécaniques.....	17
1.6. Durabilité du béton .....	20
1.6.1. Comportement du béton face à l'élévation de la température .....	20
1.6.1.1. Les formes d'endommagement thermique du béton.....	21
1.6.1.2. Mécanisme de phénomène d'éclatement et l'écaillage.....	22
1.6.1.3. L'évolution des propriétés mécaniques du béton.....	24
1.6.1.4. L'évolution des propriétés physiques du béton.....	26
1.6.2. Comportement du béton à l'attaque sulfatique externe (ASE) .....	27
1.6.2.1 Les sources externes de sulfate .....	28
1.6.2.2. Mécanisme de l'attaque sulfatique externe.....	29

## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

1.6.2.3 Les conséquences de la pénétration des ions de sulfate .....	30
1.6.2.4. Les facteurs qui influent sur l'attaque sulfatique externe.....	31
1.6.3. L'effet de l'ajout des fibres sur durabilité du béton.....	33
1.7. Conclusion .....	34
Chapitre 2 : Programme expérimental .....	37
2.1. Introduction.....	37
2.2. Caractérisation des matériaux utilisés.....	37
2.2.1. Ciment.....	37
2.2.2. Granulats .....	38
2.2.2.1. Analyse granulométrique « NF EN 933-1 » .....	38
2.2.2.2. Propriétés physiques des granulats utilisés .....	39
2.2.2.3. Propriétés mécaniques des granulats utilisés « NF EN 1097-2 ».....	40
2.2.3. L'eau de gâchage .....	40
2.2.4. Superplastifiant .....	40
2.2.5. Les fibres.....	41
2.2.5.1. Fibres d'Alfa ( StipaTenacissima) .....	41
2.2.5.2. Fibres de polypropylène.....	44
2.3. Matériel utilisé et la fabrication du béton .....	45
2.4. Essais de caractérisation .....	46
2.4.1. Caractérisation des bétons à l'état frais .....	46
2.4.2. Caractérisation des bétons à l'état durci .....	47
2.5. Essai de durabilité .....	51
2.5.1. Elévation de la température .....	51
2.5.2. Attaque sulfatique externe (ASE) .....	53
Chapitre 3 : Formulation et caractérisation des bétons fibrés.....	56
3.1. Formulation des bétons .....	56
3.2 Caractérisation des bétons à l'état frais .....	58
3.2.1 La consistance : .....	58
3.2.2 La densité : .....	59
3.3. Caractérisation des bétons à l'état durci .....	60
3.3.1 Les performances mécaniques : .....	60
3.3.2 Les performances physiques .....	62
3.4. Conclusion .....	64
Chapitre 4 : Comportement des bétons face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'ASE .....	67
4.1. Introduction.....	67
4.2. Comportement des bétons face à l'élévation de la température .....	67



## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

4.2.1. <i>Les propriétés physiques</i> .....	67
4.2.1.1. <i>Perte de masse</i> .....	67
4.2.1.2. <i>La porosité</i> .....	69
4.2.1.3. <i>Absorption capillaire</i> .....	70
4.2.2 <i>Les propriétés mécaniques</i> .....	73
4.2.2.1. <i>La résistance à la compression</i> .....	73
4.2.2.2. <i>La résistance à la traction par flexion</i> .....	75
4.2.3. <i>Comportement à la rupture du béton</i> .....	78
4.3. <i>Comportement des bétons face à l'attaque sulfatique externe</i> .....	79
4.3.1. <i>Suivi de la variation de masse</i> .....	79
4.3.2. <i>Variation de la résistance à la compression</i> .....	82
4.3.3. <i>L'observation macroscopique (à l'œil nu) :</i> .....	83
4.4. <i>Conclusion</i> .....	85
<i>Conclusion générale et perspectives</i> .....	87
<i>Références Bibliographiques</i> .....	90

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> L'essai d'affaissement.....	08
<b>Figure 1.2.</b> Courbe contrainte/déformation d'un béton testé à la compression simple.....	09
<b>Figure 1.3.</b> Courbe contrainte/déformation d'un béton testé à la traction simple .....	10
<b>Figure 1.4</b> Les fibres d'alfa.....	15
<b>Figure 1.5.</b> Quelques utilisations des fibres d'alfa .....	16
<b>Figure 1.6.</b> Les phases du développement d'un incendie réel.....	21
<b>Figure 1.7.</b> Eclatement hydraulique du béton par pression.....	23
<b>Figure 1.8.</b> Eclatement du béton par dilatation thermique empêchée .....	24
<b>Figure1.9.</b> Influence des conditions de réalisation des essais sur la résistance en compression.....	25
<b>Figure 1.10.</b> Évolution de la résistance résiduelle à la traction des bétons ordinaires.....	26
<b>Figure 1.11.</b> Cristallisation du gypse pendant l'ASE .....	30
<b>Figure 1.12.</b> les aiguilles d'ettringite secondaire.....	31
<b>Figure 2.1.</b> Courbes granulométriques des granulats utilisés.....	38
<b>Figure 2.2.</b> Différents essais réalisés sur les granulats.....	39
<b>Figure 2.3.</b> Les fibres Alfa utilisées.....	42
<b>Figure 2.4.</b> Courbe de séchage des fibres Alfa.....	42
<b>Figure2.5.</b> L'ATG et l'ATD de la fibre d'alfa.....	43
<b>Figure 2.6.</b> Les fibres de polypropylène utilisées.....	44
<b>Figure 2.7.</b> Les matériels utilisés pour la confection des bétons.....	46
<b>Figure 2.8.</b> Essais de caractérisation.....	46
<b>Figure 2. 9.</b> La machine de l'essai de compression simple.....	47
<b>Figure 2.10.</b> Machine de l'essai de traction par flexion.....	48
<b>Figure 2.11.</b> L'appareil de scie pour découper les éprouvettes de béton.....	48
<b>Figure 2.12.</b> Etuve utilisé pour sécher les éprouvettes.....	49
<b>Figure 2.13.</b> Essais de la porosité à l'eau.....	50
<b>Figure 2.14.</b> Essai de l'absorption capillaire.....	51
<b>Figure 2.15.</b> Disposition des éprouvettes dans le four.....	52
<b>Figure 2.16.</b> Cycles de chauffage – refroidissement appliqués aux échantillons.....	52

<b>Figure 2.17.</b> Protocole de l'immersion complète des éprouvettes dans la solution saline à 5 % en masse de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	53
<b>Figure 2.18.</b> Suivi de la masse.....	54
<b>Figure 2.19.</b> Essai de la résistance à la compression simple.....	54
<b>Figure 3.1.</b> Composition des granulats utilisés.....	56
<b>Figure 3.2.</b> La densité des différents des bétons OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30.....	59
<b>Figure 3.3.</b> Les résistances à la compression des différents mélanges.....	60
<b>Figure 3.4.</b> Les résistances à la traction par flexion des différents mélanges.....	61
<b>Figure 3.5.</b> La porosité des différents mélanges étudiés.....	62
<b>Figure 3.6.</b> L'absorption d'eau par capillarité des différents mélanges étudiée.....	63
<b>Figure 3.7.</b> Cinétique d'absorption des mélanges étudiés.....	64
<b>Figure 3.8.</b> Interface fibre Alfa/ matrice cimentaire .....	64
<b>Figure 4.1.</b> Perte de masse des bétons étudiés en fonction de la température.....	67
<b>Figure 4.2.</b> Evolution de la porosité absolue en fonction de la température.....	69
<b>Figure 4.3.</b> Evolution de la porosité relative en fonction de la température.....	70
<b>Figure 4.4.</b> Absorption d'eau par capillarité à 20°C.....	71
<b>Figure 4.5.</b> Absorption d'eau par capillarité à 180°C.....	71
<b>Figure 4.6.</b> Absorption d'eau par capillarité à 380°C.....	72
<b>Figure 4.7.</b> Absorption d'eau par capillarité des bétons à 600°C.....	72
<b>Figure 4.8.</b> La cinétique d'absorption des bétons en fonction de la température.....	73
<b>Figure 4.9.</b> Evolution de la résistance résiduelle à la compression des bétons en fonction de la température.....	74
<b>Figure 4.10.</b> Evolution des résistances résiduelles relatives à la compression des bétons en fonction de la température.....	74
<b>Figure 4.11.</b> Evolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion des bétons en fonction de la température.....	76
<b>Figure 4.12.</b> Evolution des résistances résiduelles relatives à la traction par flexion des mélanges de béton en fonction de la température.....	77
<b>Figure 4.13.</b> Fusion et la combustion de la fibre d'alfa à 600°C.....	78
<b>Figure 4.14.</b> Comportement à la rupture des différents bétons après exposition à des températures comprise entre 380 et 600°C.....	79
<b>Figure 4.15.</b> Suivi de masse des bétons immergés pendant une année.....	80
<b>Figure 4.16.</b> Suivi de masse des bétons immergés de 0 à 60 jours .....	80

## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

<b>Figure 4.17.</b> Observation au MEB de la fibre d'Alfa .....	81
<b>Figure 4.18.</b> Evolution des résistances à la compression en fonction de la durée d'immersion.....	82
<b>Figure 4.19.</b> Photo des échantillons après une année d'immersion complète.....	84
<b>Figure 4.20.</b> Echantillon de béton renforcé de fibres d'alfa après une année d'immersion complète dans une solution dosée à 5% de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	84

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Les différents constituants du clinker.....	05
<b>Tableau 1.2.</b> Ouvrabilité des bétons .....	08
<b>Tableau 1.3.</b> Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales .....	14
<b>Tableau 1.4.</b> Les propriétés physiques des fibres d'alfa .....	16
<b>Tableau 1.5.</b> Les propriétés mécaniques en traction des fibres d'alfa.....	16
<b>Tableau 2.1.</b> La composition chimique et les propriétés physiques du ciment utilisé .....	37
<b>Tableau 2.2.</b> Propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés.....	40
<b>Tableau 2.3.</b> Analyse chimique de l'eau utilisée.....	41
<b>Tableau 2.4.</b> Caractéristiques de l'adjuvant utilisé .....	41
<b>Tableau 2.5.</b> Propriétés des fibres de polypropylène.....	44
<b>Tableau 3.1.</b> Composition de 1 m <sup>3</sup> de béton.....	57
<b>Tableau 3.2.</b> Les proportions des bétons étudiés.....	57
<b>Tableau 3.3.</b> Les différents tests réalisés sur les mélanges.....	58
<b>Tableau 3.4.</b> L'ouvrabilité des différents mélanges.....	58
<b>Tableau 4.1.</b> Teneur en eau libre dans les différents bétons.....	68
<b>Tableau 4.2.</b> Le nombre d'échantillons testés à la résistance à la compression fonction de temps d'immersion.....	82

## Liste des notations

OC : Béton ordinaire sans fibre (BO)

AF : Fibre d'Alfa (FA)

PP : Fibre de Polypropylène (FP)

AC : Béton avec fibre d'Alfa (BF)

AC-20 : Béton avec des fibres de 20mm de l'Alfa (BFA 20)

AC-30 : Béton avec des fibres de 30mm de l'Alfa (BFA 30)

PC : Béton avec fibre de Polypropylène (BFP)

PC-20 : Béton avec des fibres de 20mm de Polypropylène (BFP 20)

PC-30 : Béton avec des fibres de 30mm de Polypropylène (BFP 30)

E/C : Rapport eau/ciment

Sp : Dosage de superplastifiant

MEB : Microscope électronique à balayage

ASE : Attaque sulfatique externe

Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

### **1. Généralités et problématique**

Les bétons renforcés de fibres se sont considérablement développés ces dernières années, Ils ont acquis une large utilisation dans de nombreux pays pour différentes applications et configurations structurelles.

Le réchauffement climatique a poussé les industriels et les chercheurs à trouver des solutions concrètes pour une production et une consommation plus respectueuse de l'environnement. Cette prise de conscience a également conduit à manifester un intérêt aux matériaux issus des ressources durables, biodégradables et recyclables.

Bien que l'utilisation de ces matériaux ne soit pas récente, les recherches encouragent de plus en plus l'extension de leur utilisation. Ces dernières s'intéressent à l'utilisation et au développement des ressources locales tout en intégrant l'aspect socio-économique des pays, surtout dans le contexte actuel, où l'inflation des prix de certains matériaux de construction favorise l'exploitation et l'utilisation des matériaux locaux, en plus de leur impact positif sur l'environnement.

L'utilisation des fibres pour le renforcement des bétons a pour but d'améliorer leur résistance à la traction et d'empêcher la propagation des fissures notamment à jeune âge.

Toutefois, les fibres peuvent affecter les caractéristiques du béton à l'état frais, notamment sa maniabilité.

Notre étude s'intéresse à l'utilisation des fibres végétales, en l'occurrence l'alfa pour améliorer la résistance à la traction et la durabilité des bétons.

### **2. Objectif de la recherche**

L'objectif principal de notre travail est d'étudier les caractéristiques physico-mécaniques et le comportement des bétons renforcés de fibres d'alfa face à l'élévation de la température comme le cas des incendies et leur durabilité vis-à-vis l'attaque



sulfatique externe comme le cas de la pollution industrielle ou de la construction sur des sols gypseux. Pour cela deux différentes longueurs de fibres ont été utilisées 20 et 30 mm.

Pour cela, nous avons confectionné cinq types de béton, deux bétons renforcés de fibres d'alfa avec les deux longueurs de fibres fixées, deux bétons renforcés de fibres de polypropylène avec les deux longueurs de fibres en question et un béton ordinaire non fibré pris comme béton témoin.

L'objectif principal est de :

- Étudier l'impact de la longueur des fibres, notamment les fibres d'alfa sur les propriétés physico-mécaniques des bétons.
- Étudier le comportement des bétons fibrés face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatique externe.

### **3. L'organisation de la thèse**

Cette étude est scindée en quatre parties :

Un premier chapitre sous forme d'une analyse bibliographique, qui comporte des généralités sur les fibres, les bétons, les bétons fibrés, les protocoles de l'étude de la durabilité, comme l'élévation de la température et l'attaque sulfatique externe. Un second chapitre, qui définit les matériaux et le matériel utilisé pour la confection de nos bétons et la mise en place des protocoles de l'étude de durabilité. Le troisième chapitre comporte la formulation et la confection des bétons ainsi que les résultats des différents essais de caractérisation, comme la résistance à la compression et à la résistance à la traction par flexion des différents mélanges et leur porosité et leur absorption capillaire. Le dernier chapitre présente les résultats de comportement des différents bétons étudiés face à l'élévation de la température et les résultats de leur durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatique externe. Une conclusion générale et des perspectives clôturent notre travail de recherche.

# **Chapitre 1 : Etude bibliographique**

## Chapitre 1 : Etude bibliographique

### 1.1 Généralités sur le béton

#### 1.1.1. Le béton

Le béton est un matériau composite homogène, qui résulte du mélange de granulats (sable et graviers), du ciment et de l'eau. Il peut contenir des additions, des fibres et un superplastifiant, selon son usage. Lorsqu'il subit des sollicitations mécaniques, thermiques, ou chimiques, les propriétés physico-mécaniques du béton liées à son hétérogénéité peuvent être modifiées, ce qui nous incite à étudier la microstructure et le rôle de ses différentes propriétés pour mieux comprendre le comportement du béton face aux différentes sollicitations auxquelles il peut être soumis.

Ce matériau composite présente également une zone sensible à l'interface pâte/granulats qu'on appelle auréole de transition. Cette zone peut représenter un point faible du béton lors des différentes sollicitations mécaniques. Cette zone est généralement caractérisée par une porosité plus élevée.

#### 1.1.2. La pâte de ciment

La pâte de ciment résulte du phénomène d'hydratation du ciment anhydre avec l'eau. Le ciment est un liant hydraulique finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation. Après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau (NF EN 197-1).

Le principal composant du ciment est le clinker, dont les constituants sont représentés dans le tableau 1.1.

**Tableau 1.2.** Les différents constituants du clinker

Composition		Notation	Proportion (%)
<b>Silicate tricalcique</b>	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60 – 65
<b>Silicate bicalcique</b>	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20 – 25
<b>Aluminate tricalcique</b>	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8 – 12
<b>Alumino-ferrite tétracalcique</b>	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8 – 10

Une fois la réaction d'hydratation a lieu, les principaux composés du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ , et  $C_4AF$  réagissent pour former de nouveaux composés qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. Les principaux composés d'hydratation du ciment se résument en :

- Le silicate de calcium hydratés «  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $H_2O$  »: c'est le principal constituant du ciment Portland hydraté, et représente de 50 à 70% de la pâte de ciment. Il assure l'adhérence entre les éléments du béton. Les propriétés mécaniques du béton dépendent beaucoup de ce constituant. Il est symbolisé par «C-S-H».
- La portlandite «  $Ca(OH)_2$  » : elle se cristallise en plaquettes hexagonales de taille importante, qui est susceptible de diminuer la résistance en compression du béton. Elle représente de 25 à 27% de la pâte cimentaire et affecte la durabilité du béton du fait qu'elle se dissout facilement dans l'eau (Hager, 2004).
- Les aluminates monocalciques hydratés : ils sont obtenus par hydratation des  $C_3A$  et jouent un rôle important dans le développement des résistances. Ils contribuent, par la rapidité relative de sa réaction, à la montée des résistances aux jeunes âges.

#### 1.1.2.1. Porosité de la pâte de ciment :

La porosité de la pâte de ciment varie de façon importante d'une formulation de béton à l'autre soit en quantité estimée de 15% pour les bétons ordinaires soit en dimension et répartition des rayons des pores dans le mélange.

On distingue deux grands types des pores (Moranville-Regourd, 1992) :

- **Les pores capillaires** : ce sont les plus gros, leur taille varie entre quelques centaines de nm à quelque mm. On les trouve entre les hydrates, les bulles d'air et les fissures. Ils ont directement liés au rapport (E /C). La dimension des pores augmente avec l'augmentation de E/C.
- **Les pores intrinsèques des hydrates** : ils sont beaucoup plus petits que les pores capillaires. Leur taille est de l'ordre du nanomètre. La dimension des pores dépend peu du rapport E/C et des conditions d'hydratation.

### 1.1.2.2. L'eau dans la pâte de ciment :

L'eau est un élément essentiel de la pâte de ciment. Elle agit non seulement pour hydrater le ciment, mais aussi pour lui assurer les propriétés de maniabilité et de résistances mécaniques nécessaires.

Les différentes formes d'eau dans la pâte de ciment sont (Regourd, 1982) :

- **L'eau capillaire ou libre** : qui est située dans les fissures et les gros pores, elle est fortement ionisée par rapport aux autres constituants minéraux du ciment. Cette eau est la première à migrer et à être éliminée lors de l'évaporation ou de la dessiccation.
- **L'eau chimiquement liée** : elle assure la réaction d'hydratation du ciment et rentre dans la composition des hydrates (Baroghel-Bouny, 1994 et Hansen, 1986).
- **L'eau absorbée** : elle se fixe aux surfaces solides, de façon physique ou chimique selon l'énergie des forces de liaisons.

### **1.1.3. Les granulats :**

Les granulats ou les agrégats représentent en moyenne de 70 à 80% du volume du béton, ils jouent un rôle important pour l'obtention d'un béton résistant. Afin d'obtenir un béton ayant une bonne résistance, il est nécessaire de contrôler (Dreux and Festa, 1998) :

- **L'origine et la minéralogie** : les granulats peuvent être naturels, artificiels ou recyclés. On citera en particulier deux types de granulats naturels : silicieux et calcaires, souvent rencontrés pour les compositions classiques de béton. Il est essentiel de connaître la minéralogie des granulats afin de prédire le comportement du béton face aux différentes pathologies comme l'alcali-réaction et l'attaque sulfatique interne.
- **Les caractéristiques géométriques** : la forme des granulats influe sur la compacité du mélange granulaire, et leur rugosité influe sur l'interface pâte/granulats.
- **La granulométrie** : c'est la distribution statistique des tailles des granulats utilisés dans la composition du béton. Une bonne distribution implique une

réduction des volumes des vides ainsi qu'une optimisation de la compacité du mélange.

## 1.2 Caractérisation du béton à l'état frais

### 1.2.1. L'ouvrabilité

L'ouvrabilité est la capacité du béton à pouvoir être mis en œuvre facilement (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) : elle caractérise la fluidité du béton avant qu'il ne durcisse.

L'ouvrabilité du béton est mesurée facilement par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams (NFP 18-451). En mesurant la hauteur de l'affaissement après le démoulage du cône (Figure 1.1.), on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton, plus la hauteur de l'affaissement est importante, plus le béton est fluide (Tableau 1.2)

**Tableau 1.2. Ouvrabilité des bétons**

Classe	Consistance du béton	Affaissement
S1	Ferme	$1 \text{ cm} \leq A \leq 4\text{cm}$
S2	Plastique	$5 \text{ cm} \leq A \leq 9\text{cm}$
S3	Très Plastique	$9 \text{ cm} \leq A \leq 15\text{cm}$
S4	Fluide	$A \geq 16 \text{ cm}$



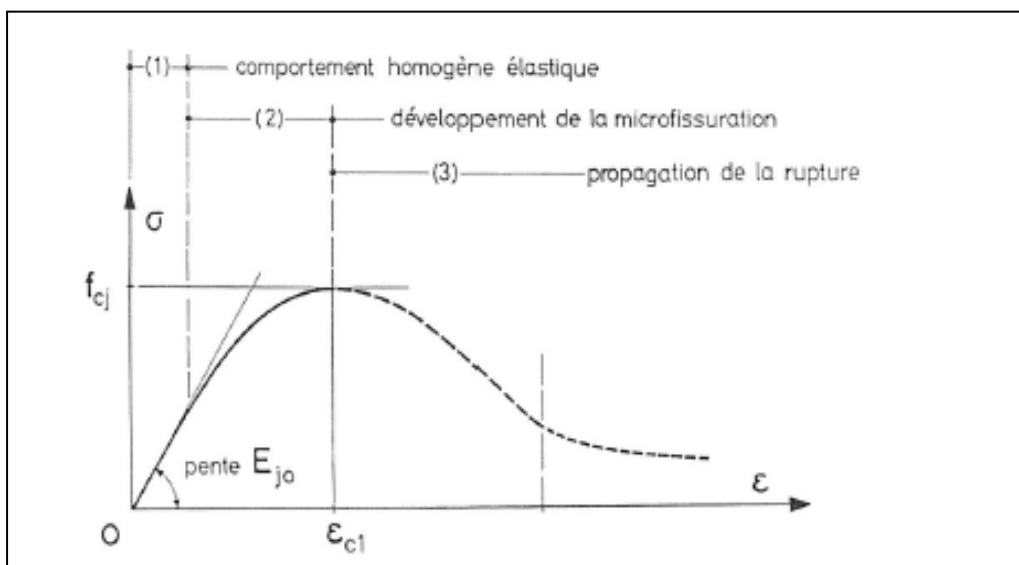
**Figure 1.1.** L'essai d'affaissement.

### 1.3 Caractérisation du béton à l'état durci

#### 1.3.1. Résistance à la compression

En général, le béton se caractérise par la résistance à la compression qui est déterminée selon la norme européenne NF EN 12390-3. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton ainsi que le rapport E/C.

Le comportement des bétons en compression est représenté par la relation contrainte-déformation (Figure 1.2)



**Figure1.2.** Courbe contrainte/déformation d'un béton testé à la compression simple (Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005).

D'après la courbe contrainte-/déformation, on distingue trois phases de comportement (Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005) :

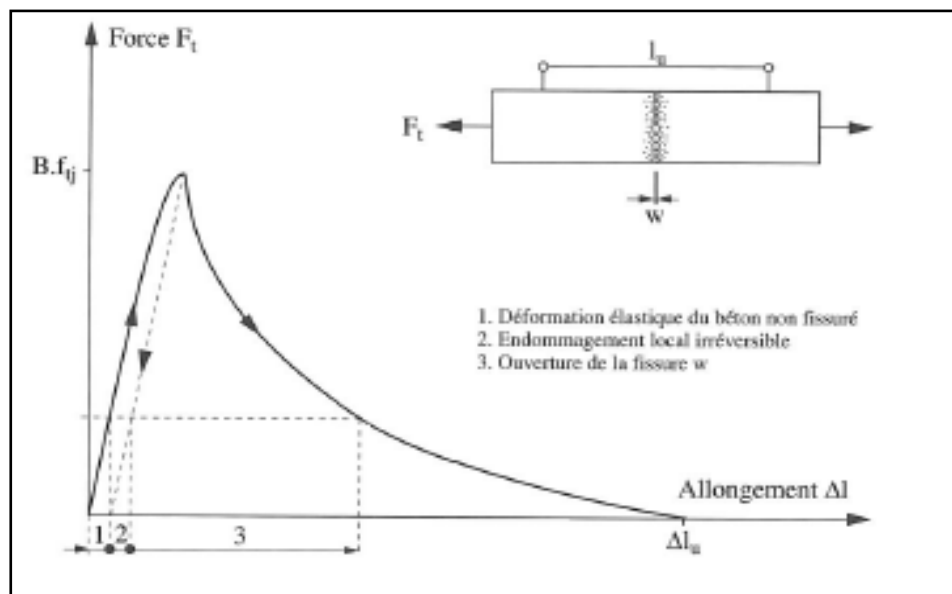
- Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation.
- Une phase de développement de la microfissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de la contrainte.

- Une phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.

### 1.3.2 Résistance à la traction

La résistance à traction des bétons est très faible et rarement mise en valeur dans les structures.

La courbe contrainte/déformation pour le comportement des bétons à traction est représentée par Figure 1.3.



**Figure 1.3.** Courbe contrainte/déformation d'un béton testé à la traction simple (Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005).

Le comportement des bétons en traction simple est quasi linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale, cette charge correspond à la formation de fissures et l'endommagement de la bande de faible largeur. Après l'apparition de la fissure, la force décroît rapidement lorsque l'allongement croît jusqu'à ce qu'il s'annule. (Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005)



## **1.4 Différents types de bétons**

### **1.4.1 Les bétons ordinaires**

Ce sont des bétons courants plus utilisés dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ce type de béton présente une masse volumique d'environ de  $2500 \text{ kg/m}^3$  et peuvent être armés ou non.

### **1.4.2 Les bétons autoplaçants**

Les bétons autoplaçants (BAP pour les éléments verticaux et BAN pour les éléments horizontaux), sont des nouveaux bétons qui intéressent beaucoup l'industrie du bâtiment et des travaux publics. Ils sont caractérisés par une très grande fluidité qui permet la réalisation de coffrages complexes.

### **1.4.3 Les bétons à hautes performances**

Les BHP sont des bétons caractérisés par une très forte résistance à la compression, puisque celle-ci varie entre 60 à 120 MPa, ainsi qu'une durabilité très supérieure à celles des bétons courants grâce à leur forte compacité et leur très faible porosité qui empêchent la pénétration des agents agressifs dans le béton et protègent les armatures de la corrosion (Baste et al, 2008).

### **1.4.4 Bétons fibrés**

Ce sont des bétons conventionnels contenant des fibres. Ces dernières sont ajoutées dans le béton pendant le malaxage, afin d'améliorer les résistances à la traction et la durabilité des bétons. Les bétons fibrés sont utilisés pour une large gamme d'applications dans les domaines de la construction, du génie civil tel que la préfabrication pour la réalisation des poutres et des voussoirs, les bétons projeté pour le renfort des murs et la réparation des tunnels. On peut également l'utiliser sous forme de mortier pour faire des enduits et des scellements. .

L'utilisation des bétons fibrés procure plusieurs avantages grâce aux propriétés que lui confèrent les fibres. Ces avantages dépendent de la nature des fibres utilisées.

## **1.5 Renforcement des bétons par des fibres**

### **1.5.1. Les fibres**

Elles sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Les fibres courtes ont l'avantage de se disperser d'une manière uniforme dans le mélange comparées aux fibres longues (Holmer et al, 1999 et Bahloul, 2006). En effet, elles sont réparties dans le mélange soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

L'introduction des fibres dans les bétons améliore leurs résistances à la traction et atténuent leur fragilité. En effet, quand les charges appliquées aux bétons s'approchent de la charge de rupture, les fibres retardent le début de la propagation des fissures, qui parfois est très rapide et les réduisent, une fois qu'elles apparaissent.

Les fibres jouent le rôle des barres d'acier dans le composite mais à petite échelle (Khelifa, 2017).

### **1.5.2. Les principales fibres utilisées dans le béton**

Les principales fibres utilisées dans la fabrication des bétons sont classées en trois types selon leur nature et leurs propriétés mécaniques :

#### ***1.5.2.1 Les fibres métalliques***

Les fibres métalliques sont les plus utilisées dans le domaine du génie civil. Elles sont utilisées comme renfort pour améliorer les propriétés mécaniques du béton avec un dosage courant qui varie de 0.5 à 2% en volume selon le type de fibres. Ces fibres sont caractérisées par un module de Young élevé (200 GPa) ; ainsi qu'une bonne résistance en traction (entre 800 et 2 500 MPa).

Il existe de nombreux types des fibres métalliques qui se différencient les unes des autres par leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur diamètre, leur longueur et leurs modes d'élaboration. En effet, les fibres d'acier peuvent être rectilignes, ondulées, ou présentent des élargissements aux extrémités, soit en crochets pour améliorer l'accrochage et, ou peuvent présenter des aspérités, des crans.

### **1.5.2.2 Les fibres synthétiques**

Les fibres synthétiques sont apparues à la fin de XIX<sup>ème</sup> siècle sous le nom rayonne. Elles résultent de réactions chimiques complexes conduisant à la polymérisation de motifs élémentaires souvent dérivés du pétrole. Ces fibres comprennent les fibres de polypropylène, de polyéthylène, acryliques ou encore de polyester, de nylon, de verre ou de carbone. Les fibres de polypropylène sont ajoutées dans le béton pour améliorer leurs performances mécaniques et limiter la propagation des fissurations liée au retrait et améliorer la tenue au feu des bétons. Elles sont généralement ajoutées avec un dosage faible, compris entre 0.06 et 0.2% en volume selon leur fiche technique.

### **1.5.2.3 Les fibres naturelles**

L'exploitation des fibres naturelles dans le domaine de construction est relativement récente. L'utilisation de ces fibres dans les matrices cimentaires quel que soit leur origine : animale ou végétale a connu un développement considérable ces dernières années, ceci est dû à leur faible coût de production et leur impact positif sur l'environnement. L'incorporation de ces fibres dans les matrices cimentaires conduit au développement de certaines de leurs propriétés. Dans notre étude, on s'intéresse plus aux fibres végétales non traitées chimiquement.

### **1.5.3. Les fibres végétales**

Les fibres naturelles d'origine végétale sont extraites des plantes, soit de la tige comme le lin et le chanvre, soit de la feuille comme les fibres de palmier dattier voir même du fruit lui-même comme la noix de coco. Elles font partie de la biomasse.

Ces fibres sont caractérisées par une faible densité, un pouvoir d'isolation thermique, des résistances à la traction élevées, et une biodégradabilité qui constitue un avantage majeur pour l'écologie (FRD, 2012 et Khelifa, 2017). Les principaux composants chimiques des fibres végétales sont :

- *La cellulose* qui constitue le principal composant dans la quasi-totalité des fibres végétales et représente la matière la plus abondante sur la surface de la terre, plus de 50 % de la biomasse (Dallel, 2012).

La cellulose est à la source des propriétés de cohésion et de l'aspect hydrophilique des fibres naturelles. Elle est difficilement soluble et n'est fusible qu'à partir de 320°C (Khelifa, 2017).

- *La lignine* représente le second composant après la cellulose, elle confère à la plante une imperméabilité à l'eau et une grande résistance à la décomposition. La lignine stocke des phénoliques toxiques sous forme libre que la plante a neutralisée, elle joue un rôle de stockage des déchets des plantes et sa production naturelle est estimée à près d'un milliard de tonnes par an (Khelifa, 2017).
- *L'hémicellulose* est le 3<sup>ème</sup> composant des fibres végétales juste après la cellulose et la lignine, elles représentent avec une proportion en poids près de 25% de la biomasse (Dallel, 2012). Les hémicelluloses forment la matrice de support des micro-fibrilles de cellulose. Contrairement à la cellulose, elles sont composées de sucres neutres et sont très hydrophiles, solubles en milieu alcalin et facilement hydrolysables dans les acides (Do Thi, 2011 et Khelifa, 2017).
- *Les pectines* qui sont présentes en quantités moins importantes que la cellulose et la lignine mais restent un élément important dans la biomasse végétale. Elles jouent le rôle d'un ciment entre les cellules des tissus végétaux qui les rendent plus rigides et maintiennent la cohésion entre eux (Khelifa, 2017).

Les proportions en pourcentage des composants principaux des fibres végétales les plus utilisées dans l'industrie sont données par le Tableau 1.3 (Dallel, 2012) :

**Tableau 1.3.** Composition chimique (en %) de différentes fibres végétales

<b>Fibres</b>	<b>Cellulose</b>	<b>Hémicelluloses</b>	<b>Lignine</b>	<b>Pectine</b>	<b>Cire</b>
<b>Coton</b>	85 - 90	5,7	0,7 – 1,6	0 - 1	0,6
<b>Lin</b>	71	18,6 – 20,6	2.2	2,3	1,7
<b>Chanvre</b>	70 - 74	17,9 – 22,4	3,7 – 5,7	0,9	0,8
<b>Jute</b>	61,1- 71,3	13,6 – 20,4	12 - 13	0,2	0,5
<b>Ramie</b>	68,6 – 76,2	13,1 – 16,7	0,6 – 0,7	1.9	0,3
<b>Sisal</b>	66 - 78	10 - 14	10 - 14	10	2
<b>Coco</b>	32 - 43	0,15 – 0,25	40 - 45	3 - 4	-
<b>Alfa</b>	45	24	24	5	2

On peut utiliser les fibres végétales dans le béton selon l'intérêt et l'objectif que l'on s'est fixé. Pour l'utilisation des fibres, il faut prendre en compte certaines caractéristiques tel que : la température de fusion ( $T_f$ ), la longueur de la fibre ( $L$ ), son diamètre ( $D$ ) et sa densité ( $\rho$ ). Ces facteurs ont une grande influence sur les performances mécaniques du béton.

Dans notre étude, nous nous intéresserons au renforcement du béton par des fibres d'alfa.

#### ***1.5.3.1. Fibres d'alfa (Stipa Tenacissima L)***

Les fibres d'alfa se présentent sous la forme des touffes d'herbe (Figure 1.4), constituées des tiges cylindriques à une hauteur d'environ 1 m (Rokbi et al, 2011). La fibre d'alfa est une plante renouvelable pouvant être intégrée de façon rationnelle dans le domaine de la construction (Khelifa, 2017).



**Figure 1.4.** Les fibres d'alfa.

Ces fibres ont été retenues pour des raisons de disponibilité et d'économie. Selon le portail de l'agriculture marocaine, la répartition territoriale de l'alfa est connu dans :

- Algérie: 4.000.000 ha
- Maroc: 3.186.000 ha
- Tunisie: 600.000 ha
- Lybie: 350.000 ha

- Espagne: 300.000 ha
- Portugal : peu

Ces fibres sont largement utilisées pour fabriquer des cordes, de la vannerie, du papier, et actuellement, pour renforcer le béton (Figure 1.5). Elles sont récoltées dans les régions arides du bassin méditerranéen tel que Hodna, El-Oued et Djelfa en Algérie.



**Figure 1.5.** Quelques utilisations des fibres d’alfa

Les propriétés physiques et mécaniques de l’alfa sont présentées dans les tableaux 1.4 et 1.5.

**Tableau1.4.** Les propriétés physiques des fibres d’alfa (Dallel, 2012)

Cellulose (%)	Angle micro-fibrillaire (°)	Diamètre (µm)	Longueur (mm)	Rapport L / d
45	/	5-95	5-50	1964

**Tableau1.5.** Les propriétés mécaniques en traction des fibres d’alfa (Brahim, 2007)

E (GPa)	All (%)	σ (MPa)	Densité
13-17.8	1.5-2.4	134-220	1.4

#### **1.5.4. L'effet des fibres sur le comportement du béton**

Plusieurs études ont montré que la présence des fibres dans le béton influe sur leur comportement et leur durabilité. L'effet de l'incorporation des fibres influe sur les caractéristiques suivantes des bétons :

##### ***1.5.4.1. Sur l'ouvrabilité***

L'ajout des fibres dans le béton influe sur la maniabilité et la densité du béton frais. Cet effet dépend du type de la fibre ajoutée. Quelque soit le type des fibres, leur introduction dans les mélange améliore la cohésion et par conséquent diminue sa maniabilité (Le Hoang, 2013). En revanche, le volume de fibres joue un rôle sur l'ouvrabilité. Yazi et al. (Yazi et al, 2006) mettent en évidence l'importance du rapport l/d et du volume des fibres. L'augmentation du l/d accroît le problème de distribution hétérogène et de floculation des fibres. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

L'introduction des fibres végétales dans les matériaux cimentaires semble réduire la maniabilité (El Hilali, 2009; Le Hoang, 2013; Ahmed, 2013; Laifa et al, 2014; Khelifa et al 2016 et Khelifa, 2017). Le Hoang et J. Page et al (Le Hoang, 2013 et Page, 2015) ont conclu que la maniabilité est fortement influencée par l'ajout de fibres de lin, plus la longueur et le taux de fibres augmente, plus la maniabilité du béton diminue (Ahmed, 2013).

Khelifa et al (Khelifa et al, 2016) ont remarqué que plus l'apport en fibres d'alfa augmente, plus l'ouvrabilité et la maniabilité du mélange diminuent. D'autre études ont montré (Laifa et al ,2014) que l'effet des fibres de Diss est légèrement moins important que celui des fibres de polypropylène sur la fluidité des mélanges. Les auteurs expliquent cette perte de maniabilité par l'absorption d'eau des fibres végétales (Ahmed, 2013; Khelifa et al, 2016).

##### ***1.5.4.2. Sur les performances mécaniques***

###### ***A. La résistance en compression***

**\* L'effet de l'ajout des fibres métalliques et de polypropylène :**

Plusieurs chercheurs ont montré que l'introduction des fibres influe légèrement sur la résistance à la compression des bétons, Ils ont trouvé (Zha, 1991) qu'une augmentation de la résistance à la compression d'environ 20% était possible avec l'ajout des fibres métalliques. Yazı et al. (Yazı et al, 2006) ont également montré qu'il y'avait une augmentation des résistances à la compression en renforçant le béton de fibres métalliques en fonction du rapport l/d et du volume de fibres.

Concernant l'ajout des fibres de polypropylène les résistances en compression varient légèrement avec des dosages inférieurs à 3 kg/m<sup>3</sup> de fibres (Baya, 2002 et Suha, 2006). Par contre, Hager (Hager, 2004) a observé une baisse de résistance pour des bétons contenant fibres de polypropylène. Pliya et Yermak (Pliya, 2010 et Yermak, 2015) ont étudié quant-à eux, l'effet du cocktail de fibres métalliques et de polypropylène, ils ont montré que l'ajout de ce cocktail de fibres conduit à une amélioration des résistances de compression du béton.

### **\* L'effet de l'ajout des fibres végétales**

D'après la littérature, l'effet de l'incorporation des fibres végétales sur le comportement des matériaux cimentaires influe sur les résistances à la compression à long terme car à court terme, elles sont assez faibles à cause de la cellulose contenue dans les fibres végétales qui joue un rôle de retardateur de prise (Sedan et al, 2008).

Plusieurs chercheurs ont remarqué une diminution de la résistance à la compression avec l'incorporation des fibres végétales car elles augmentent le volume de vides et réduisent la compacité du composite (Ramaswamy et al, 1983 ; Lewis ; Premalal, 1979 ; Aziz et al, 1981 et Khelifa et al, 2016).

D'autres études ont abouti au fait que plus la teneur en fibres d'alfa augmente, plus la résistance à la compression du béton diminue (Khelifa et al 2016), ils ont remarqué également une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur de fibres d'alfa. La diminution de la résistance en compression des bétons est automatique avec l'ajout de fibres d'alfa, à cause de la dispersion hétérogène des fibres et la possibilité d'apparition des pelotes. Une diminution de la résistance à la compression de 20% pour les bétons avec 0.5% de fibres de chanvre a aussi remarqué à l'étude (Awwad et al, 2012). Tandis qu'Ahmed (Ahmed 2013) a constaté une amélioration de 8,3 % de la résistance à la compression pour l'ajout de 2 kg/m<sup>3</sup> de fibre de lin.



### ***B. La résistance à traction***

L'incorporation des fibres dans le béton joue un rôle très important sur leurs résistances à la traction. Grâce à un effet de couture des fibres, la propagation de fissures est retardée voir empêchée, ce qui entraîne une augmentation de la résistance à la traction par flexion. Cette augmentation dépend des propriétés mécaniques et géométriques des fibres (Kriker et al, 2005).

#### **\* L'effet de l'ajout des fibres métalliques et de polypropylène**

De nombreuses études ont montré qu'une amélioration de la résistance en traction des matériaux cimentaires avec l'ajout des fibres. Kawamata et al (Kawamata et al, 2000) ont ajouté des fibres métalliques avec des longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un taux volumique optimal en fibres égale à 1%. Ils ont trouvé que l'augmentation la longueur de fibres métalliques entraîne une amélioration de la résistance mécanique à la traction par flexion.

Dans leur travail de recherche, Yazici et al. (Yazici et al, 2006) ont également trouvé que la résistance à la traction par flexion augmente avec l'ajout des fibres métalliques, selon le rapport l/d et le volume de fibres. Parmi les études de l'effet de l'ajout de fibres de polypropylène (Mazaheripour, et al. 2011) il a été constaté qu'une augmentation de 10.7 % et 14.4% de la résistance à la traction par fendage et à la flexion respectivement.

#### **\* L'effet de l'ajout des fibres végétales**

Concernant l'effet des fibres végétales sur la résistance à la traction, plusieurs études montrent l'effet positif de l'ajout des fibres végétales tel que les fibres de Diss (Laifa et al, 2014), les fibres de lin (Ahmed 2013), les fibres de chanvre (Awwad et al, 2012), sur la résistance en traction par flexion des mélanges.

Khelifa et al (Khelifa et al. 2016) ont étudié l'effet des fibres de l'alfa et de polypropylène sur les performances mécaniques des bétons. Leurs résultats ont indiqué que la fibre de polypropylène n'améliore pas la résistance à la traction par fendage, par contre ils ont observé une augmentation de la résistance à la traction par

fendage des bétons contenant 1.5% de fibre d'alfa. Ils ont aussi remarqué qu'au-delà de 1,5% de fibres d'alfa, les résistances à la traction diminuent.

En ce qui concerne la longueur des fibres végétale, plusieurs travaux scientifiques montrent que les performances mécaniques sont fortement liées à la longueur des fibres. Certaines études (Ali, Li et al. 2013) ont montré que les fibres de noix de coco utilisées avec différents longueurs et diamètres dans les bétons amélioreraient leur performance particulièrement pour des longueurs de fibres de 30 mm.

Kriker et al (Kriker et al, 2005) ont utilisé dans leur étude les fibres de palmier dattier pour une longueur qui varie de 15 à 60 mm. Ils ont conclu que l'augmentation de la longueur et le volume de fibre provoquent une amélioration de la résistance à la flexion et du coefficient de la ténacité.

### **1.6. Durabilité du béton**

La durabilité est un point très important pour les bétons. Elle apparut dans les années 1980 (Quenee, B et Al. 2013) et se définit par l'étude de la capacité du béton à résister aux conditions d'exposition dans le temps. Les performances mécaniques et la durabilité du béton sont liées aux caractéristiques suivantes :

- Le volume et la nature des hydrates tels que la structure de la pâte hydratée, le type de ciment, la présence d'ajouts cimentaires et d'adjuvant.
- Les paramètres de formulation comme le rapport E/C, la compacité du mélange et l'utilisation des fibres,
- Les conditions d'exposition telle que l'attaque au gel/dégel, les attaques chimiques et l'incendie.

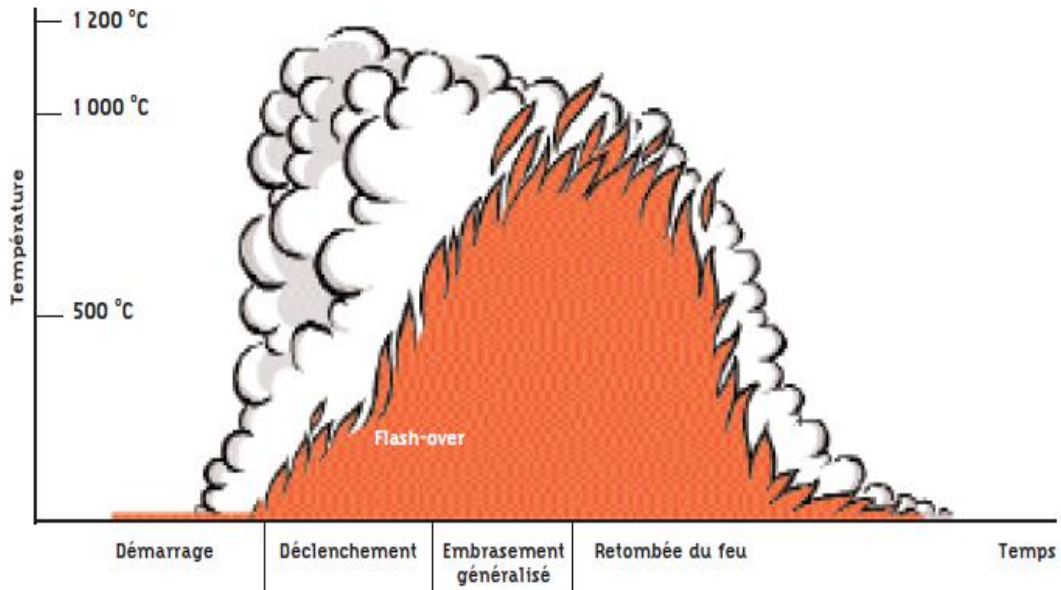
Notre travail s'intéresse au comportement du béton fibré face à l'élévation de la température et sa durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatiques externes.

#### **1.6.1. Comportement du béton face à l'élévation de la température**

L'incendie est un risque très dangereux avec des conséquences désastreuses pouvant engendrer beaucoup de victimes en termes de vie humaines et beaucoup de dégâts

matériels. De ce fait, il est très important de prendre les précautions nécessaires pour réduire les dommages associés.

Les phases de développement d'un incendie réel sont représentées par la Figure 1.6 :



**Figure 1.6.** Les phases du développement d'un incendie réel (ITM-SST 1551.1).

En cas d'incendie, la température augmente graduellement à 1000 °C, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'intérieur du béton jusqu'à 700 °C (Kim et Lee, 2015) ce qui entraîne la détérioration des matériaux (Bažant et al, 1996).

Durant la période de chauffage, plusieurs phénomènes physiques et chimiques se produisent et conduisent à la modification de la microstructure du composite et affectent les propriétés thermiques, hydriques et mécaniques du béton (Kim et Lee, 2015 ; Li et al, 2004 et Handoo et al, 2002).

#### ***1.6.1.1. Les formes d'endommagement thermique du béton***

Les différentes formes d'endommagement thermique du béton se présentent comme suit (Albert, 2013) :

- **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes d'incendie ou d'un essai standard. Il peut se produire à une

température supérieure à 100°C. Il est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.

- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, il est caractérisé par le détachement de petits morceaux allant jusqu'à 20 mm de longueur du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface sous l'effet de la montée en température du composite. Il est causé principalement par le phénomène de conversion du quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle** : il se produit dans les stades avancés de l'incendie, lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et aux coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi de l'apparition des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit, ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et par la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

#### *1.6.1.2. Mécanisme de phénomène d'éclatement et l'écaillage*

En générale, il existe deux processus pour expliquer le phénomène d'éclatement de béton chauffé :

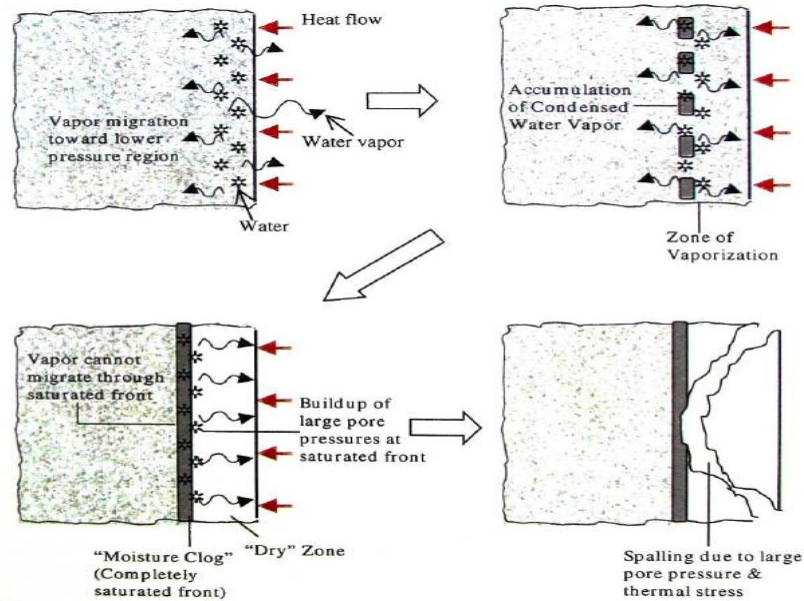
- **L'éclatement hydraulique par pression**

L'éclatement hydraulique par pression est lié à l'augmentation de la pression de l'eau liquide ou en phase vapeur lors du chauffage. Une première partie d'eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une seconde partie migre vers les zones froides à l'intérieur du composite puis se condense par la suite comme le montre la Figure 1.7 (Harmathy, 1965, Consolazio et al,1997)

Une accumulation d'eau dans les pores des zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Ce bouchon provoque une montée de la pression

interne des pores des zones les plus chaudes. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques donnent naissance au phénomène d'instabilité thermique.

Dans le cas du béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement (Albert, 2013).

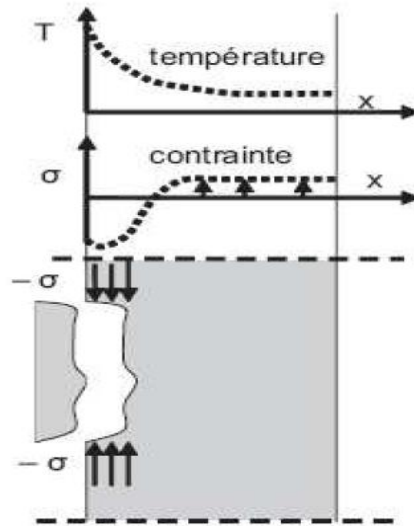


**Figure 1.7.** Eclatement hydraulique du béton par pression (Consolazio et al, 1997)

- **L'éclatement par la formation thermique empêchée**

Il est représenté par le processus thermomécanique lié à la température à l'intérieur du béton.

Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression. Ces dernières entraînent une destruction des matériaux par laminage parallèle à la surface chauffée comme le montre la Figure 1.8 (Bazant, 1997, Albert, 2013 et Pliya, 2010)



**Figure 1.8.** Eclatement du béton par dilatation thermique empêchée (Bazant, 1997)

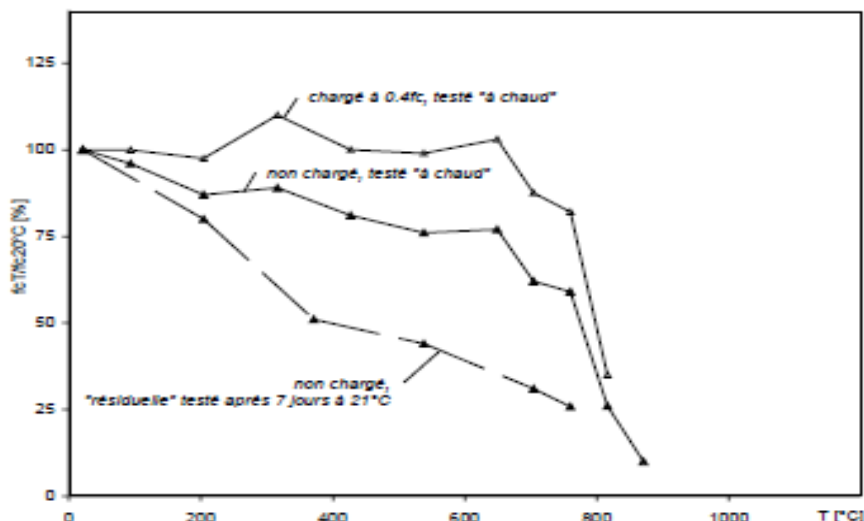
### 1.6.1.3. L'évolution des propriétés mécaniques du béton

Différentes études ont été réalisées sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton en fonction de la température, elles ont montré une diminution progressive de la résistance à la compression, de la traction et du module élastique des bétons étudiés au cours de l'élévation de la température ;

- **La résistance à la compression**

La baisse de la résistance en compression du béton face à l'élévation de la température est due à l'évolution de la microstructure causée par le retrait de la matrice provoqué par la phase de séchage et de déshydratation (Dejong et Ulm, 2007 et Hammoud, 2013). La résistance à la compression mesurée à chaud est le plus souvent supérieure à celle mesurée à froid.

Abrams (Abrams, 1971) a étudié l'influence des conditions de la réalisation des essais « à chaud » et « résiduelles » ainsi que les essais « chargés » et « non chargés » sur la résistance à la compression du béton (Figure 1.9). Les résultats obtenus ont montré que l'évolution de la résistance en compression testée « à chaud » est affectée fortement par l'application de la charge mécanique de  $0.4f_c$ . Durant l'échauffement, il a enregistré une croissance de la résistance de 10% à 300°C par rapport à la valeur de référence mesurée à température ambiante. La résistance du matériau « non chargé » se dégrade progressivement.



**Figure 1.9.** Influence des conditions de réalisation des essais sur la résistance en compression (Abrams, 1971).

Vis-à-vis de l'élévation de la température, les bétons présentent une augmentation de la résistance en compression entre 100 - 200°C (Dejong et Ulm, 2007) et entre 100 - 300 °C (Harada et al., 1972). Cette augmentation est dû à la phase de séchage et le début de la déshydratation qui provoque un retrait de la matrice et améliore ainsi la compacité du matériau et donc sa résistance à la compression (Dejong et Ulm, 2007). Au delà de ces températures, le béton est complètement sec avec une diminution progressive de la résistance à la compression en fonction de l'élévation de la température (Hammoud, 2013).

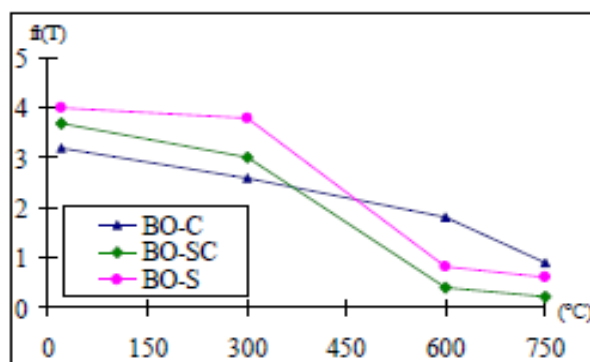
- **La résistance à la traction**

La résistance à la traction des bétons diminue en fonction de l'élévation de la température comme c'est le cas de la résistance à la compression.

La mesure de la résistance à la traction est réalisée après le refroidissement généralement par fendage parce qu'il y a une complexité de réaliser l'essai de traction directe à cause de la localisation de l'endommagement et du développement de la macro-fissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale du matériau (Hammoud, 2013).

Xing a étudié l'influence des granulats de calcaire, de silex (silico-calcaire) et siliceux sur la résistance en traction résiduelle et relative par fendage des bétons ordinaires en fonction de la température. Il a constaté que le comportement résiduel en

traction du béton avec des granulats calcaires était nettement meilleur que celui du beton avec des granulats de silex et des granulat siliceux (Figure 1.10, (Xing, 2011)).



**Figure 1.10.** Évolution de la résistance résiduelle à la traction des bétons ordinaires (Xing, 2011).

- **Le module d'élasticité**

L'évolution du module d'élasticité à haute température n'est pas présent dans la littérature comme c'est le cas des propriétés mécaniques précédentes (Albert, 2013).

L'évolution du module élastique en fonction de la température est déterminé à partir des courbes contraintes /déformations lors des essais de compression ou de traction et à partir des courbes charge/flèche dans le cas d'un essai de flexion (Menou, 2004). Il diminue d'une manière progressive et identique en fonction de la température.

Le rapport eau/ciment et le type de béton n'influe pas sur l'évolution du module d'élasticité (Albert, 2013). Il varie non seulement en fonction de l'élévation de la température à laquelle est exposé le composite, mais aussi avec le scénario d'échauffement qui dépend de la vitesse de montée en température, de l'essai à chaud ou après refroidissement, .... (Hager, 2004).

#### **1.6.1.4. L'évolution des propriétés physiques du béton**

- **La porosité**

La porosité des bétons augmente en fonction de l'élévation de température en raison de l'ouverture des microfissures engendrée par la dilatation différentielle pâte/granulat suite au départ d'une grande partie de l'eau liée (Pliya, 2010).



- **La perméabilité**

L'évolution de la perméabilité en fonction de la température a été étudiée dans plusieurs recherches, elle dépend fondamentalement de la porosité de la pâte de ciment qui, à son tour, est tributaire du rapport E/C ainsi que de la maturité du béton (Hammoud, 2013). La perméabilité augmente en fonction de la température à cause du départ de l'eau capillaire dans les microfissures de la matrice, elle est fortement liée à la déshydratation des C-S-H et à l'apparition et le développement de fissures engendrées par l'incompatibilité de déformations entre la pâte de ciment/granulats.

- **La perte de masse**

Pendant les cycles chauffage/refroidissement, la masse du béton varie suite l'évaporation d'eau et à la déshydratation progressive du gel C-S-H.

Les résultats des essais expérimentaux de la perte de masse en fonction de la l'élévation de la température montrent qu'elle :

Début à partir de 100°C (Hager, 2004), dans cette phase la perte de masse est due au départ de l'eau libre contenue dans le béton;

Augmente rapidement entre 150°C et 300°C (Albert, 2013 et Hager, 2004), ceci est du au départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates C-S-H et à la décomposition du gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Diminue au delà de 300°C (Albert, 2013) à cause de la déshydroxylation de la portlandite entre 450°C et 550°C, à la décomposition des silanols (SiOH) entre 400°C et 570°C et à la décarbonatation du calcaire  $\text{CaCO}_3$  entre 600 et 800°C (Xing, 2011).

### **1.6.2. Comportement du béton à l'attaque sulfatique externe (ASE)**

L'attaque des bétons par les sulfates provoque la précipitation de produits sulfatés secondaires, une expansion importante et la détérioration chimio-mécanique, la fissuration et la perte de résistance du béton.

Certaines structures en béton comme les ponts, les fondations et les tuyaux en béton sont exposés à un environnement sulfureux du fait que tout au long de leur vie, elles se trouvent en contact direct avec la source de sulfates interne ou externe (Chen et al, 2009 et Ranjani and Ramamurthy, 2012).

Des sources internes de sulfate se trouvent dans les compositions du béton : ciment ou es granulats ou provenir de sources externes comme le sol, les eaux souterraines, les eaux d'infiltrations ou les pluies acides associées à la pollution atmosphérique industrielle.

Dans notre cas nous nous sommes intéressés aux attaques sulfatiques externes, dont les sources sont définies dans ce qui suit :

#### ***1.6.2.1 Les sources externes de sulfate***

Les ions sulfates peuvent provenir de sources externes telles que :

- ***Les sols***

Dans certaines régions où les sols contiennent du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), on peut rencontrer des concentrations élevées (> 5%). Les sols alluviaux ou argileux peuvent aussi contenir des pyrites qui s'oxydent en sulfates au contact de l'air et de l'humidité avec la formation d'acide sulfurique.

En Algérie, Les sols gypseux sont très répandus ; on en compte 8000 km<sup>2</sup> ce qui représente 12% des sols gypseux du monde selon le classement (FAO, 1990).

- **Les eaux souterraines séléniteuses**

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols contenant des sulfates naturels ou issus de pollutions industrielles, se chargent en ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . La concentration en ions dépend de la solubilité du sulfate et donc de la température et de la présence de sel.

Dans les eaux souterraines, les concentrations les plus élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfates de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ) ou de sulfates alcalins ( $\text{K}_2\text{SO}_4$  -  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Les sulfates d'ammonium  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  se retrouvent fréquemment dans les terrains de culture riches en engrais (Horkoss, 2011).

- **L'eau de mer**

L'eau de mer renferme des ions variés mais c'est l'action des sulfates de magnésium à partir de 2,2 g/l de  $MgSO_4$ , qui peut entraîner le plus de désordres d'origine chimique dans un béton.

- **L'environnement**

Les environnements industriels particulièrement l'industrie chimique, les usines d'engrais, la combustion du charbon qui dégage du dioxyde de soufre, les pluies acides polluent l'atmosphère.

### ***1.6.2.2. Mécanisme de l'attaque sulfatique externe***

L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton, parce que les propriétés mécaniques et la composition chimique des matériaux cimentaires se trouvent affecter lorsque les ions de sulfate pénètrent dans le béton.

La pénétration des ions sulfates dans les bétons crée des composés expansifs tels que le gypse, l'ettringite et la thaumasite (Glasser et al. 2008), ce qui entraînent un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton.

Selon la littérature, le mécanisme d'attaque sulfatique externe (ASE) d'un matériau cimentaire associé aux sulfates de sodium suit un processus en trois étapes :

- La première étape: le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui sont contrôlés par la perméabilité et la diffusivité des matériaux (Planel, 2002).
- La deuxième étape: la réaction des ions sulfates avec les ions du calcium  $Ca^{2+}$  pour former du gypse et avec les aluminates anhydres ou hydratés pour former l'ettringite.
- La troisième étape: la Fissuration due aux pressions internes engendrées accentuant la pénétration des sulfates et provoquant la destruction progressive du béton.

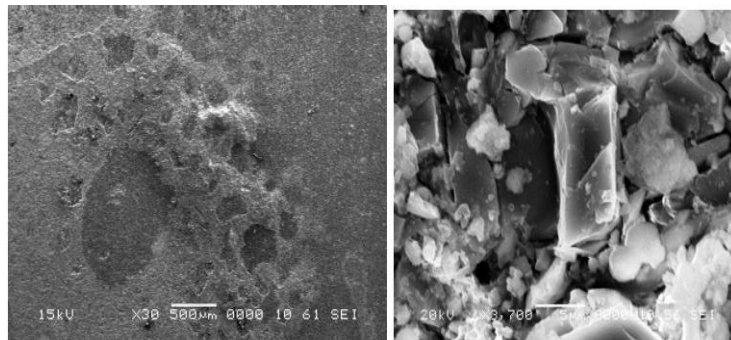
L'intensité du mécanisme de l'expansion sulfatique va dépendre de (Skalny and Pierce, 1998) :

- La qualité du béton : à savoir la composition du ciment, le mode de fabrication, la cure, l'état d'endommagement du béton avant l'attaque.
- L'exposition sur le site : qui se traduit par la concentration en  $\text{SO}_4^{2-}$  et sa distribution dans le sol, l'humidité et les opportunités de transport.
- Les conditions environnementales et atmosphériques : comme les changements d'humidité, la fréquence des intempéries, la température et la surface exposée

### 1.6.2.3 Les conséquences de la pénétration des ions de sulfate

- **Gypse secondaire**

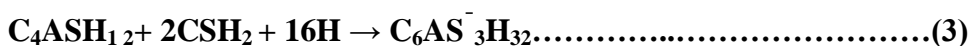
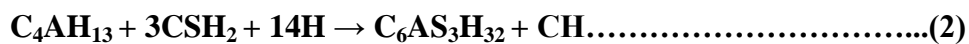
Le gypse secondaire se forme par la réaction entre le sulfate et les ions de calcium libérés durant l'hydratation du ciment (Lea, 1971), celui-ci résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfatés au niveau de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , selon l'équation suivante (Rozière, Loukili et al. 2009) :



**Figure 1.11.** Cristallisation du gypse pendant l'ASE (Touloum and Brara, 2014).

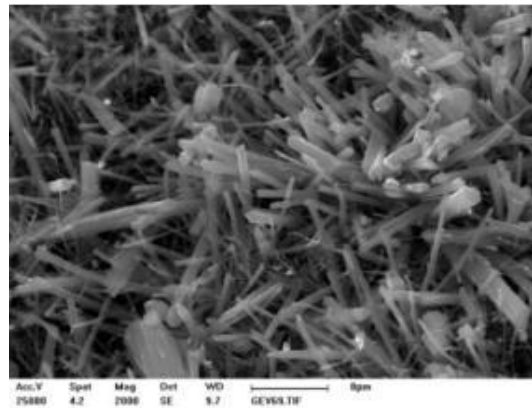
- **L'ettringite :**

Dans notre cas, on désigne par l'ettringite, l'ettringite secondaire, appelée aussi sel de Candlot. Elle se forme selon les équations suivantes (Rozière, Loukili et al., 2009) :



L'ettringite (Figure 1.12) se forme directement par l'action des sulfates externes sur les aluminates et les hydrates calciques du béton, elle conduit à une déstructuration du matériau pouvant aller jusqu'à la ruine de l'ouvrage (Le Roux and Orsetti, 2000).

Elle cristallise dans les espaces vides du matériau tels que les pores, les fissures et les interfaces pâte/granulats (Castella, 2011). Ainsi, d'après Wang (Wang, 1994), la formation de l'ettringite est moins agressive que la formation du gypse.



**Figure1.12.** les aiguilles d'ettringite secondaire (Castella, 2011)

#### ***1.6.2.4. Les facteurs qui influent sur l'attaque sulfatique externe***

Les facteurs majeurs qui influent sur le mécanisme et les conséquences de l'attaque sulfatique externe sont les suivants :

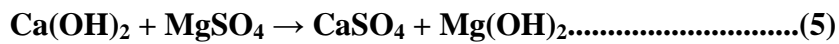
- ***Le cation et la concentration des ions du sulfate***

L'attaque sulfatique externe est liée à la teneur en sulfate dans une solution. En effet, plus la concentration en sulfate est élevée, plus la cinétique de l'attaque augmente (Barbarulo, 2007 et Yu et al, 2013).

Le cation associé aux sulfates a une influence sur les conséquences de l'attaque sulfatique comme :

- Le sulfate de sodium ( $2\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) qui est le plus utilisé dans les études de recherche, il entraîne la formation du gypse et de l'ettringite expansive. Cette dernière n'est pas stable dans des milieux pauvres en hydroxyde de calcium et dont le pH est inférieur à 11 (Santhanam, 2001 ; Irassar, 2003).

- L'attaque aux sulfates de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est la plus lente à cause de sa faible solubilité. Le sulfate de calcium réagit principalement avec l'aluminate tricalcique  $\text{C}_3\text{A}$  pour former de l'ettringite expansive (Neville, 2004).
- Le sulfate de magnésium ( $\text{Mg}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est très agressif par rapport au sulfate de sodium et de calcium (Baron et Ollivier, 1996, Neville, 2004). Les conséquences de cette attaque sont l'écaillage et le délitage du béton, ainsi que la perte de cohésion qui se traduit par une baisse de résistance à la compression du béton. Le sulfate de magnésium ( $\text{Mg}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) réagit avec la chaux hydratée pour donner du gypse secondaire et du  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  comme le montre l'équation (5). Par ailleurs, son action sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'ettringite :



- ***Le renouvellement de la solution saline***

Le renouvellement de la solution saline permet d'avoir une source de sulfate continue dans la solution et crée ainsi un mécanisme d'attaque sulfatique externe plus rapide (Higgins and Crammond, 2003). Le renouvellement fréquent de la solution empêche la précipitation du gypse en surface (Planel, 2002)

- ***L'effet de la composition de ciment***

L'approche conventionnelle de la résistance aux sulfates est d'avoir un ciment faible en  $\text{C}_3\text{A}$  pour éviter à la formation de l'ettringite dans les pores du béton soumis à une attaque sulfatique externe. Selon la norme NF P 15-317, la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  d'un ciment doit être inférieure à 5% pour qu'il résiste au mieux aux sulfates.

La réduction de la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  semble permettre d'éviter la formation d'ettringite et l'accélération de la dégradation résultant d'une microfissuration (EL Hachem et al, 2011). Tandis que l'utilisation de ciments Portland à faible teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  n'est pas toujours un moyen efficace pour préserver les matériaux cimentaires contre l'attaque par les sulfates de magnésium, car dans ce genre d'attaque, les hydrates de silicate de calcium deviennent la cible (Higgins and Crammond, 2003 ; Schmidt et al, 2008).

- *L'effet de rapport E/C*

La résistance aux sulfates augmente quand le rapport E/C diminue, car plus le rapport E/C est faible, plus la porosité et la perméabilité sont faibles et plus la pénétration des ions agressifs est retardée.

- *L'effet de la nature des granulats*

La nature minéralogique des granulats a une influence importante sur la résistance aux sulfates (Higgins and Crammond, 2003).

Massaad et al (Massaad et al, 2017) ont testé des échantillons dont les compositions se distinguent par la taille des granulats et la formulation. Leurs résultats montrent que la structure des granulats des échantillons a aussi une influence sur les produits formés lors de l'attaque sulfatique externe. La taille des granulats influe sur la diffusion des sulfates conduisant à la formation de phases minéralogiques différentes.

### **1.6.3. L'effet de l'ajout des fibres sur durabilité du béton**

De manière générale, l'utilisation des fibres de polypropylène est la plus efficace pour lutter contre la fissuration, réduire l'éclatement et améliorer le comportement du béton sous l'élévation de la température (Kalifa, 2000), (Komonen et al, 2003, Noumowé, 2005, Hager, 2004, Pliya, 2010).

Les analyses ATD et ATG des fibres de polypropylène réalisées par Kalifa et al. (Kalifa et al, 2001) montrent qu'un premier pic au point de fusion des fibres de polypropylène à une température 171°C ; un second pic à une température 341°C correspond à la vaporisation des fibres et le troisième pic, au point de carbonatation à 457°C.

La fusion des fibres polypropylène crée des vides supplémentaires et par conséquent crée un espace permettant l'évaporation de l'eau et la libération de la pression interne.

Pliya (Pliya, 2010) a utilisé les fibres de polypropylène dans le béton avec des dosages de 1, 1.5 et 2 kg/m<sup>3</sup>. Les résultats de leur travail montrent que l'addition des

fibres de polypropylène dans le béton permet d'améliorer sa stabilité thermique et le dosage à 1.5 kg/m<sup>3</sup> semble conduire aux meilleures résistances résiduelles.

Tandis que, l'incorporation de fibres métalliques est proposée comme une solution efficace pour améliorer les performances mécaniques résiduelles des bétons permettant ainsi de réduire les coûts de réparation a posteriori (Yermak,2015), les recherches actuelles portent sur leur remplacement par des fibres végétales plus économique et plus respectueuses de l'environnement (Page, 2017). Des essais expérimentaux sur le comportement des bétons renforcés par des fibres de lin ont été réalisés à haute température, qui ont abouti à une diminution significative des propriétés mécaniques de ces bio-béton. Cette diminution peut s'expliquer par la décomposition thermique des fibres de lin à une température de 250 ° C et la porosité du béton a été fortement augmentée ce qui a généré une diminution significative des performances mécaniques du composite.

Les travaux d'Ozerkan et al (Ozerkan et al, 2013) ont montré que l'incorporation des fibres des feuilles du palmier dattier dans les mortiers cimentaires améliore sa résistance aux attaques des sulfates.

Les tests de durabilité sur des bétons renforcés de fibres d'alfa, particulièrement l'attaque sulfatique externe et l'élévation de température réalisés par Khelifa (Khelifa, 2017) ont montré que les bétons renforcés de 1 et 1.5% d'alfa n'ont pas présenté de symptômes de dégradation, ni d'efflorescence causés par les sels et ont conclu que le béton renforcé à 1% de fibres d'alfa est celui dont les résultats se rapprochaient de ceux des bétons ordinaires.

### **1.7. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons tenté de présenter les connaissances de base sur les différentes compositions de béton ainsi que leur comportement face à l'élévation de la température et à l'attaque sulfatique externe. Comme cas particulier, nous avons détaillé les propriétés des bétons fibrés ainsi le rôle des fibres dans le comportement et la durabilité des bétons.



## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

À partir de cette étude, nous remarquons que les fibres végétales réduisent légèrement les caractéristiques à l'état frais et les résistances mécaniques à la compression des bétons.

Notre étude consistera à étudier le renforcement des bétons par des fibres d'alfa non traitées chimiquement pour la confection de béton destinés à la construction.

Grace à leur disponibilité, à leur coût et à leurs caractéristiques mécaniques, notamment leur bonne résistance à la traction, ces fibres peuvent remplacer d'autres fibres métalliques soient-elles ou synthétiques à base de dérivés de pétrole. Ces fibres sont disponibles en Algérie en quantités suffisantes et ne nécessite ni arrosage ni entretien, ni pesticides, elle pousse toutes seules dans la nature.

## **Chapitre 2 : Programme expérimental**

## Chapitre 2 : Programme expérimental

### 2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents matériaux et outils utilisés pour la confection des différents bétons étudiés, ainsi que le protocole des différents essais effectués sur nos bétons à l'état frais comme à l'état durci.

Deux différentes longueurs de fibres ont été utilisées à savoir 20 mm et 30 mm: L'influence de deux différentes longueurs des fibres est aussi étudiée en fonction de type de béton.

### 2.2. Caractérisation des matériaux utilisés

#### 2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEMII/A 42.5 provenant D'El-Hama (région de Constantine), il est conforme à la norme EN197-1. La composition chimique et les propriétés physiques fournies par le fabricant, du ciment utilisé sont présentées dans le tableau 2.1.

**Tableau 2.1** La composition chimique et les propriétés physiques du ciment utilisé.

Composition	Valeur
CaO (%)	61,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5,37
Si O <sub>2</sub> (%)	19,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,00
MgO (%)	1,80
Na <sub>2</sub> O (%)	0,14
K <sub>2</sub> O (%)	0,76
SO <sub>3</sub> (%)	2,20
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3,150
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,215
La finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3371

### 2.2.2. Granulats

Les granulats utilisés résultant du concassage de la roche calcaire, proviennent de la carrière « SNC GRANULAT GROUZ FRERES BENISSAAD », Djebel GROUZ de la wilaya de Mila (Est l'Algérie). Trois classes de granulats ont été utilisées : sable 0/3, graviers 3/8 et 8/16. Les différents essais effectués sur les granulats utilisés sont les suivants :

#### 2.2.2.1. Analyse granulométrique « NF EN 933-1 »

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exception des fillers.

La Figure 2. 1. Présente les courbes granulométriques des granulats utilisés dans notre étude.

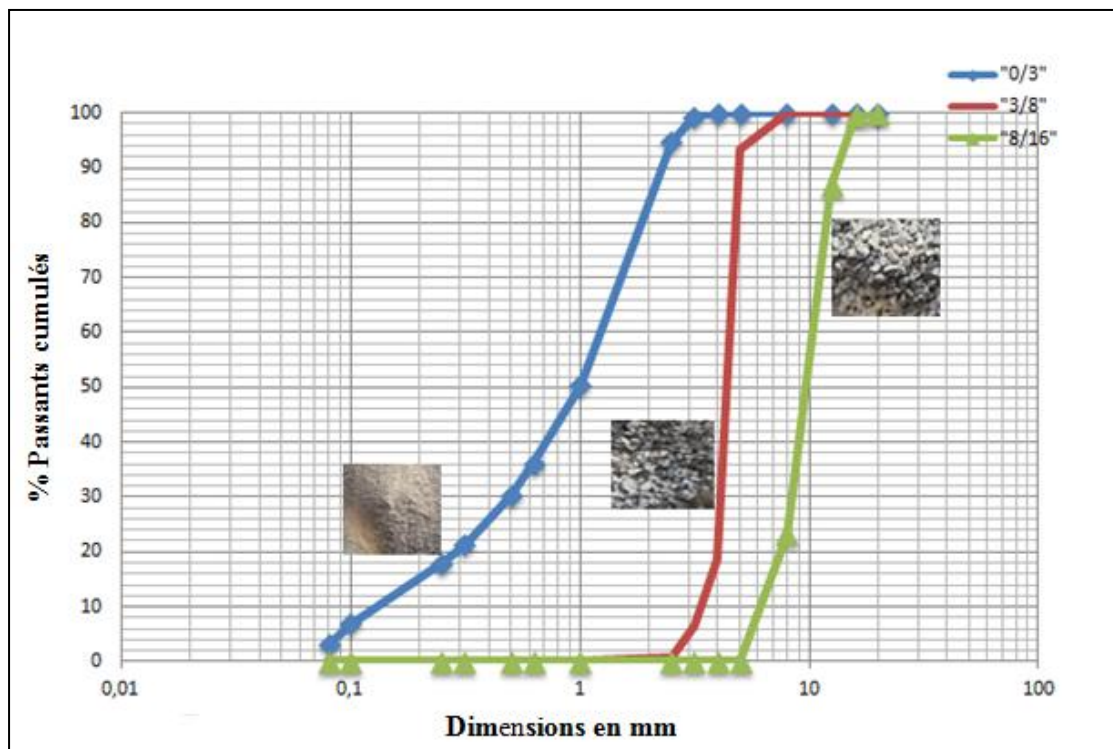


Figure 2.1. Courbes granulométriques des granulats utilisés.

### 2.2.2.2. Propriétés physiques des granulats utilisés

Nous avons réalisé des propriétés physiques des granulats comme le module de finesse, la masse volumique, l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène ont réalisés (Figure 2.2.).



**Figure 2.2.** Différents essais réalisés sur les granulats.

#### **A. Module de finesse**

Le module de finesse ( $M_f$ ) est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages sur la série de tamis.

#### **B. La masse volumique « NF EN 1097-3 »**

La masse volumique ( $M_v$ ) est nécessaire pour l'élaboration de la composition d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

#### **C. Essai d'équivalent de sable « NF EN 933-8 »**

L'essai d'équivalent de sable (ESV) permet de déterminer la propreté d'un sable.

**D. Essai au bleu méthylène « NF EN 933-9 »**

L'essai au bleu de méthylène est utilisé pour déterminer la teneur en argile dans les fines fractions d'agrégats et pour quantifier la propreté du sable.

**2.2.2.3. Propriétés mécaniques des granulats utilisés « NF EN 1097-2 »**

C'est la détermination de la résistance aux chocs des différents granulats à l'aide de l'essai Los Angeles. Cet essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant la fragmentation du granulat testé aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles .

Les résultats des différents essais physiques et mécaniques sont donnés dans le Tableau 2.2.

**Tableau 2.2.** Propriétés physiques et mécaniques des granulats utilisés.

<b>Granulats</b>	<b>Sable 0/3</b>	<b>Gravier 3/8</b>	<b>Gravier 8/16</b>
<b>M<sub>f</sub></b>	3	-	-
<b>MV Absolut (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,5	2,67	2,60
<b>MV Apparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.43	1.37	1.39
<b>ESV</b>	75	-	-
<b>Bleu méthylène</b>	1.15	-	-
<b>Los Angles (%)</b>	-	-	23.5

**2.2.3. L'eau de gâchage**

L'eau utilisée dans notre étude est l'eau potable du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de Constantine1. Le tableau 2.3 représente l'analyse chimique de l'eau utilisée.

**2.2.4. Superplastifiant**

Le superplastifiant utilisé est le Master Glenium 26. C'est un adjuvant haut réducteur d'eau à base d'éther polycarboxylates modifié destiné à la confection des bétons de haute qualité. Son dosage varie entre 0,3 et 2,0 % du poids du ciment.

Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton. Le tableau 2.4 représente les caractéristiques du Master Glenium 26.

**Tableau 2.3.** Analyse chimique de l'eau utilisée

<b>Echantillons</b>	<b>Concentrations (mg/l)</b>
<i>Matière en suspension</i>	Traces
<i>Sels dissous</i>	1470
<i>Sulfates (<math>SO_4^{-2}</math>)</i>	413,56
<i>Chlorures (Cl)</i>	298,2
<i>PH</i>	7,9
<i>Calcium (<math>Ca^{+2}</math>)</i>	36
<i>Magnésium (<math>Mg^{+2}</math>)</i>	60
<i>Bicarbonates (<math>HCO_3^-</math>)</i>	27
<i>Carbonates</i>	3,5
<i>Température (°C)</i>	19

**Tableau 2.4.** Caractéristiques de l'adjuvant utilisé (Master Glenium 26).

<b>Aspect</b>	<b>Liquide</b>
<b>Couleur</b>	Brun
<b>pH</b>	$7 \pm 1$
<b>La densité</b>	$1,08g/cm^3 \pm 0,02$
<b>la teneur en chlorures</b>	$\leq 0,1 \%$
<b>Taux des alcalins</b>	$<2\%$

## 2.2.5. Les fibres

### 2.2.5.1. Fibres d'Alfa ( *StipaTenacissima*)

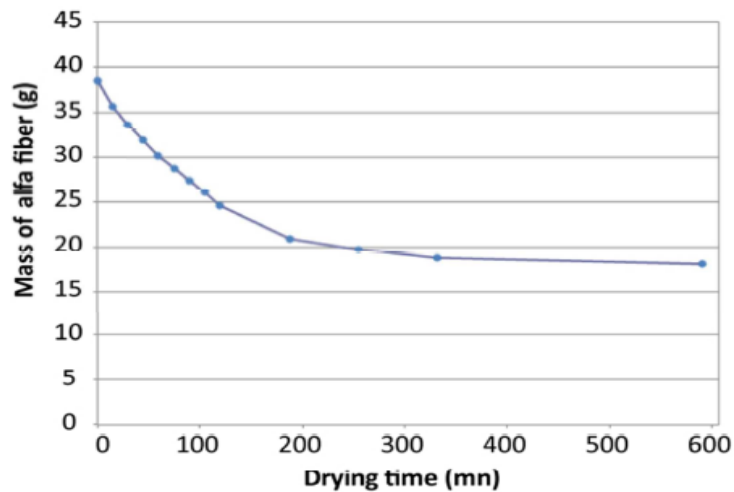
Les fibres d'alfa utilisées proviennent de la région d'Ain-Touta (Est de l'Algérie). Elles ont été séchées à 50°C jusqu'à stabilisation de leur poids, puis coupées en deux longueurs différentes; 20mm et 30mm.

Les fibres d'alfa ont été mouillées 2 heures (Khelifa.2017; Khelifa et al .2016) avant leur incorporation dans le mélange pour éviter qu'elles n'absorbent l'eau de gâchage

(Figure 2.3). Le temps de mouillage a été estimé à partir de la courbe de séchage des fibres Alfa (Figure 2.4).



**Figure 2.3.** Les fibres Alfa utilisées



**Figure 2.4.** Courbe de séchage des fibres Alfa (Khelifa.2017; Khelifa et al .2016)

La figure 2.5 représente l'analyse thermogravimétrique (ATG), et l'analyse thermique différentielle (ATD) de la fibre d'alfa. Ces analyses permettent de déterminer les différentes températures de transformation de la fibre d'alfa sous l'effet de la température.

Ces essais ont été réalisés au laboratoire de physicochimie des polymères des interfaces de l'université de Cergy-Pontoise.

La courbe ATG montre que la fibre d'alfa perd de la masse avec l'augmentation de la température jusqu'à 600 °C, quant-au diagramme ATD, il montre que la fibre alfa est associée de phénomène exothermique.



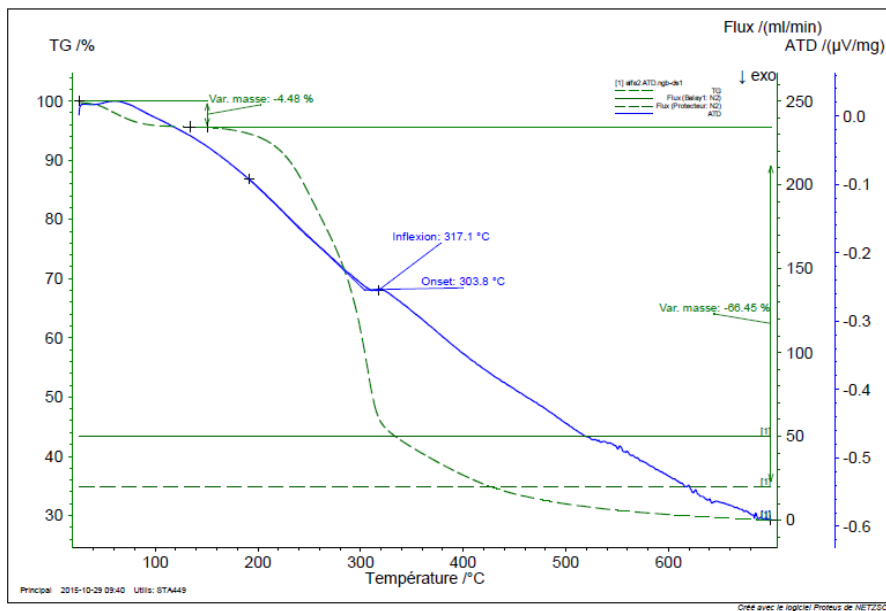


Figure 2.5. L'ATG et l'ATD de la fibre d'alfa.

Les phases suivantes peuvent être distinguées:

- Phase I (de 25 à 180 °C): elle représente une faible perte de masse, estimée à 4,48%. Cette perte due à l'évaporation de l'eau absorbée et elle se produit entre 0 et 100 °C. Après 100 °C, l'évolution de cette perte est pratiquement nulle, la masse varie peu à une température comprise entre 100 et 180 °C et aucune réaction exothermique ou endothermique n'est observée dans l'ATD ce qui indique que les fibres d'alfa sont stables à ces températures.
- Phase II (de 180 à 420 °C): au-delà de 180 °C, on observe une perte de masse qui correspond à la décomposition thermique de l'alfa, cependant, dans cette phase, on note une importante perte de masse de près de 66,45%. On enregistre un changement de pente dans la courbe ATG au-delà de 240 °C, qui correspond à la dégradation de l'hémicellulose et la pectine. Des études montrent que l'hémicellulose et la pectine se dégradent entre 250 et 320 °C (Yang et al, 2007 ; Ouajai and Shanks, 2005 ; Martins and Joekes, 2003 ; Joseph et al, 2003). A 303,8 °C, on enregistre l'inflexion de la courbe ATD, ainsi qu'un changement de pente dans la courbe ATG qui se traduit par la dégradation de la cellulose à 317,1 °C. Certaines études de recherche s'accordent pour affirmer que la cellulose se dégraderait entre 300 et 420 °C (Yang et al, 2007 ; Martins and Joekes, 2003).

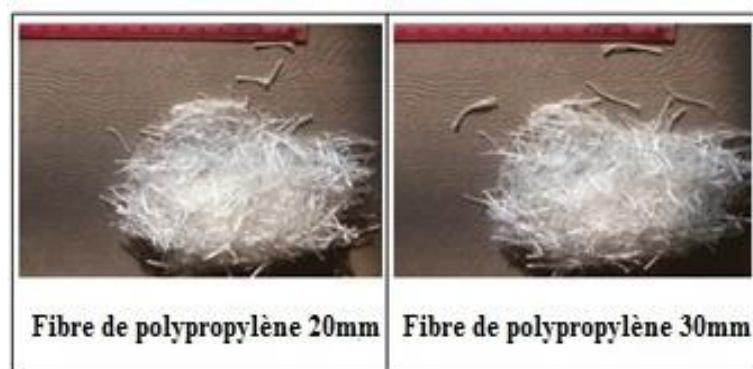
## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

La perte de masse enregistrée au-delà de 320 °C, peut être expliquée par une première décomposition de lignine, plus lente car elle se dégrade sur large gamme de température ; de 160 à 900 °C (Yang et al, 2007; Do Thi, 2011).

- Phase III (au-delà de 420 °C): dans la dernière phase, on enregistre de variation de perte d'environ 5%, qui correspond à la dégradation thermique de la lignine et des résidus résultant de la décomposition des principaux composants lors de la phase précédente.

### 2.2.5.2. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène utilisées dans cette étude sont des fibres TUF-STRAND MAXTEN provenant du Canada (Figure 2.6). Ce sont des macros fibres synthétiques qui ont été découpées en deux longueurs différentes de 20 et 30 mm.



**Figure 2.6** Les fibres de polypropylène utilisées

Les propriétés de ces fibres sont présentées dans le Tableau 2.5.

**Tableau 2.5** Propriétés des fibres de polypropylène.

Propriétés	Description
Densité	0,91
Résistance en traction (MPa)	600 à 650
Point de fusion	160°C
Dosages recommandé (kg/m <sup>3</sup> )	1.8 à 3.0
La conductivité thermique	Faible

### 2.3. Matériel utilisé et la fabrication du béton

La méthode de fabrication des différents types des bétons est le suivant :

- Pré mouillage du malaxeur ;
- Introduction des constituants du plus gros granulat au plus petit (sable puis le ciment) ;
- Malaxage des constituants anhydre pendant 2 minutes;
- Ajout des fibres d'alfa ou polypropylène, puis fait le malaxage à sec des constituants pendant 1 minute, afin d'homogénéiser ;
- Ajout 2/3 de l'eau totale de gâchage dans le malaxeur en mélangeant pendant 1 minute ;
- Introduction le superplastifiant dans le reste d'eau ;
- Ajout du reste d'eau avec le superplastifiant. Mélange pendant 3 minutes;

Le béton a été coulé dans les moules cylindriques et prismatiques en deux couche, chaque éprouvette a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes/ couche.

Des éprouvettes cylindriques 10x20 cm ont été utilisées pour les essais de compression simple et des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm ont été utilisées pour les essais de traction par flexion. Les échantillons sont conservés à l'air ambiant dans le laboratoire jusqu'au jour de l'écrasement (Figure 2.7).

## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés



**Figure 2.7.** Les matériels utilisés pour la confection des bétons.

### 2.4. Essais de caractérisation

#### 2.4.1. Caractérisation des bétons à l'état frais

##### 2.4.1.1. Essai d'Affaissement

L'affaissement a été effectué à l'aide du cône d'Abrams selon la norme NFP 18-451 (Figure 2.8),



**Figure 2.8.** Essais de caractérisation

#### 2.4.1.2. Calcul de la masse volumique

En utilisant la formule :  $\rho = (P-P_0)/V$  (Figure 2.8)

Avec :

- P est la masse de l'éprouvette pleine de béton
- $P_0$  est la masse de l'éprouvette vide
- $\rho$  est la densité du béton frais et V le volume de l'éprouvette

#### 2.4.2. Caractérisation des bétons à l'état durci

##### 2.4.2.1. Compression simple

L'essai de compression simple est réalisé à 7, 28 et 90 jours sur les éprouvettes cylindriques en utilisant la presse CONTROLS (Figure 2.9), avec un asservissement constant et croissant à la vitesse de 0.5 KN/s  $\pm 10\%$  jusqu'à la rupture. Les faces d'appui des éprouvettes sont rectifiées au lapidaire, pour acquérir une planéité de la surface et éviter la dissymétrie lors de l'essai de compression, les éprouvettes sont placées verticalement et leurs faces sont en contact direct avec les plateaux de la presse.



**Figure 2. 9.** La machine de l'essai de compression simple.

#### 2.4.2.2. Traction par flexion

Les essais de traction par flexion en trois points sont réalisés sur les éprouvettes prismatiques à 7, 28 et 90 jours.

Les échantillons sont soumis à un moment de flexion par application d'une charge constante et continue au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs en trois points sur une presse CONTROLS à vérin hydraulique et d'une capacité de 3000 KN (Figure 2.10). La mesure est quasi-statique et la vitesse d'asservissement du compactage est très faible, de  $0,1 \text{ KN/S} \pm 1\%$ .



**Figure 2.10.** Machine de l'essai de traction par flexion.

#### 2.4.2.3. L'essai de la porosité

La porosité accessible à l'eau, dite porosité ouverte, caractérise l'importance des vides que contient un matériau. Elle a été calculée selon la norme NF EN 18-459.

La porosité accessible à l'eau des différents bétons a été mesurée sur deux échantillons  $7 \times 7 \times 5$  cm sciés à partir des échantillons  $7 \times 7 \times 28$  cm (Figure 2.11). Les échantillons testés ont été séchés dans une étuve à une température de  $105^\circ\text{C}$  pendant 24 heures (Figure 2.12), puis laissés à l'air libre pour refroidissement et enfin saturés dans l'eau à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  pendant 72 heures (Figure 2.13).



**Figure 2.11** L'appareil de scie pour découper les éprouvettes de béton.



**Figure 2.12** Etuve utilisé pour sécher les éprouvettes.

La porosité accessible à l'eau est calculée selon la formule :

$$\text{Porosité} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100(\text{en } \%), \quad \text{Avec:}$$

$M_{\text{air}}$  : masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'air;

$M_{\text{sec}}$  : masse de l'échantillon sec (étuvé à 105°C);

$M_{\text{eau}}$ : masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'eau.



**Figure 2.13.** Essais de la porosité à l'eau.

#### 2.4.2.4. L'essai de l'absorption capillaire

L'absorption capillaire des bétons est mesurée pour une durée de 24h. Elle a été aussi effectuée sur deux échantillons de dimensions 7x7x5 cm. Les échantillons des différents bétons sont préalablement séchés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures, et laissés par la suite se refroidir à l'air libre.

Les surfaces latérales des échantillons sont couvertes avec un adhésif pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis leurs surfaces sciées sont immergées à 0.5 cm d'eau (Figure 2.14). Les pesées sont réalisées à ¼, ½, 1, 2, 4, 6, 24h. Le coefficient d'absorption est calculé à chaque fois par la formule:

$$\text{L'absorption capillaire} = \frac{M_T - M_0}{A} \quad \text{avec :}$$

$M_T$ : masse de l'échantillon à l'échéance T;

$M_0$ : masse initiale de l'éprouvette séchée dans l'étuve à 105°C;

A: aire de section de l'éprouvette qui est égale à (0,7x0,7) cm<sup>2</sup>.





**Figure 2.14.** Essai de l'absorption capillaire.

## 2.5. Essai de durabilité

### 2.5.1. Elévation de la température

Après 90 jours de conservation, les échantillons ont été chauffés dans un four électrique avec une vitesse de montée en température de 1 °C/min (Figure 2.15). La vitesse de 1°C/min est la plus utilisée et recommandée dans le cas des dimensions de nos échantillons (Rilem, 2007; Khelifa, 2017). Les échantillons ont été exposés à une température de 180, 380 et 600 °C. La température d'exposition a été maintenue pendant une heure pour chaque palier. Pour chaque cycle, le refroidissement à température ambiante n'est pas piloté, il se réalise de manière naturelle en fonction de la température du four qui est maintenu fermé. La courbe temps-température du four est représentée dans la Figure 2.16 (Pliya, 2010).

Les cycles de 180 et 380 °C correspondent respectivement à la fin de la fusion des fibres de polypropylène et des fibres d'alfa (Khelifa, 2017).

Tous les échantillons ont été pesés avant et après chaque traitement thermique pour déterminer la perte de masse. Après chaque cycle de chauffage, les échantillons sont pesés directement pour éviter une réhydratation avec le milieu environnant.

La perte de masse est obtenue en utilisant la formule :  $\Delta_{mi} = \frac{m_a - m_{Ti}}{m_a} \times 100$  avec :

$\Delta_{mi}$  : La perte de masse en %,

$m_a$  : La masse de l'échantillon à température ambiante avant le chauffage

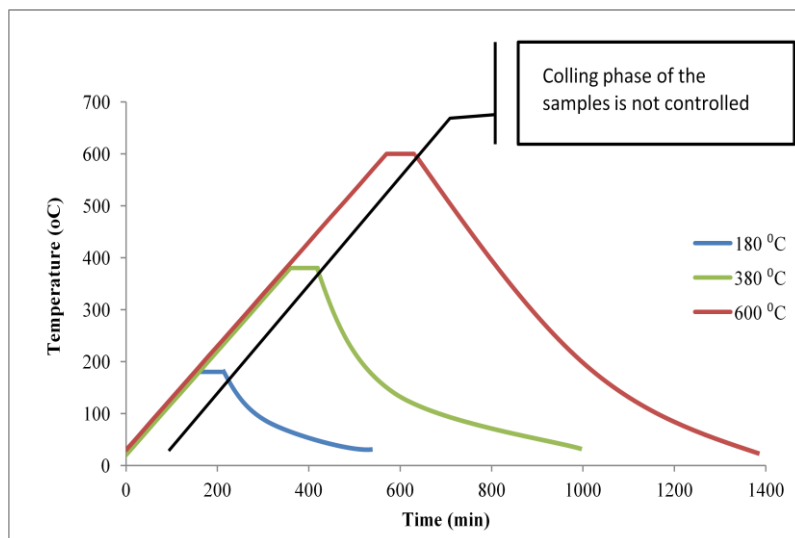
$m_{Ti}$  : La masse de l'échantillon refroidi après le cycle de chauffage – refroidissement.

## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

Les échantillons ont été testés par la suite à la compression simple et à la traction par flexion, et la porosité à l'eau ainsi que l'absorption capillaire ont été calculées selon les normes en vigueur avant et après chaque cycle.



**Figure 2.15.**Disposition des éprouvettes dans le four.



**Figure 2.16** Cycles de chauffage – refroidissement sollicités aux échantillons

### 2.5.2. Attaque sulfatique externe (ASE)

Le protocole utilisé pour l'étude de l'effet de l'attaque sulfatique externe est l'immersion complète (Figure 2.17). C'est le protocole le plus utilisé d'après la littérature (Ghrici et al, 2005 ; Ghrici et al, 2006 et Khelifa, 2009).

Nous avons utilisé des échantillons cubiques de béton (7x7x7 cm) pour étudier l'impact de l'attaque sulfatique externe sur nos bétons.

Après 28 jours, les éprouvettes sont entièrement immergées dans une solution dosée à 5% de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) à  $20\pm 5^\circ\text{C}$  (Ghrici et al, 2005 ; Ghrici et al, 2006 ; GCI-714, 2008 et Khelifa, 2009).



**Figure 2.17.** Protocole de l'immersion complète des éprouvettes dans la solution saline à 5 % en masse de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Ce protocole consiste à étudier l'évolution du comportement des échantillons de béton soumis à l'ASE pendant 360 jours.

On calcule d'abord la variation de la masse tous les 15 jours d'immersion (Figure 2.18), en utilisant la formule :  $M_{v\%} = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100$  Avec :

$M_{v\%}$  : La variation de la masse en %

$M_0$  : La masse initiale de l'échantillon avant son immersion

$M_i$  : La masse de l'échantillon en après son immersion



**Figure 2.18.**Suivi de la masse

Dans un second temps, on détermine la résistance à compression simple des échantillons des différents bétons immergés dans l'eau saline après 0, 50, 90, 270 et 360 jours (Figure 2.19).

Une observation à l'œil nu est effectuée tout le long des cycles pour localiser d'éventuelles fissurations dues à l'ASE.



**Figure 2.19** Essai de la résistance à la compression simple

## **Chapitre 3 : Formulation et caractérisation des bétons fibrés**

## Chapitre 3 : Formulation et caractérisation des bétons fibrés.

### 3.1. Formulation des bétons

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'incorporation des fibres d'alfa non traitées chimiquement dans un béton de structure pour améliorer leurs performances mécaniques comme la résistance à la traction et pour limiter la propagation de la fissuration.

Trois familles de béton ont été confectionnées :

- Béton sans fibre (OC),
- Béton avec des fibres d'alfa (AC),
- Béton avec des fibres de polypropylène (PC)

Les bétons étudiés sont de classe C25/30 avec un rapport E/C = 0,5 et un dosage de ciment de 350 Kg/m<sup>3</sup>.

La méthode de formulation est celle de Dreux-Gorisse (Dreux and Festa, 1998).

La composition des granulats utilisés est représentée dans la figure 3.1.

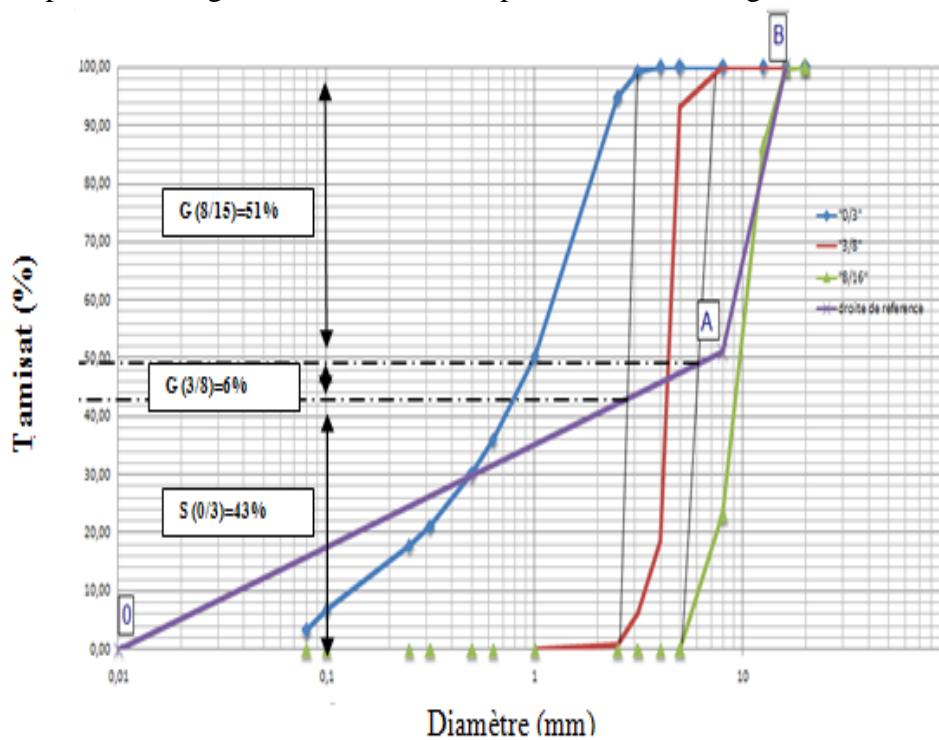


Figure 3.1. Composition des granulats utilisés

La composition de 1 m<sup>3</sup> de béton est donnée dans Tableau 3.1 :

**Tableau 3.1.** Composition de 1 m<sup>3</sup> de béton.

Quantité	Ciment	Eau	Sable	Gravier(3/8)	Gravier(8/15)	SP
(Kg/m <sup>3</sup> )	350	175	727	109	897	2.31

Deux bétons renforcés de fibres d'alfa ont été confectionnés l'un avec des fibres de longueur 20 mm « AC-20 » et le second avec des fibres de 30 mm « AC-30 », tous deux avec un dosage de 1% en volume. Le dosage de fibres d'alfa a été choisi à partir de la littérature (Khelifa et al .2016).

Deux autres bétons renforcés de fibres de polypropylène ont aussi été confectionnés, l'un avec des fibres de longueur 20 mm « PC-20 » et l'autre avec des fibres de 30 mm « PC-30 », tous deux avec un dosage de 0.22% en volume imposé par la fiche technique du fabricant. Le béton ordinaire « OC » est pris comme béton témoin

Les proportions des différents bétons confectionnés sont données dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2.** Les proportions des bétons étudiés.

Quantité	OC	AC-20	AC-30	PC-20	PC-30
<b>Ciment</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	350
<b>eau</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	175	175	175	175	175
<b>Sable</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	727	727	727	727	727
<b>gravier (3/8)</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	109	109	109	109	109
<b>gravier (8/15)</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	897	897	897	897	897
<b>Sp</b> (Kg/m <sup>3</sup> )	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
<b>AF</b> (%)	-	1	1	-	-
<b>PP</b> (%)	-	-	-	0.22	0.22

Les différents tests réalisés sur les bétons étudiés (OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30) sont représentés dans le Tableau 3.3 :

**Tableau 3.3** Les différents tests réalisés sur les mélanges

Echantillons	OC	AC-20	AC-30	PC-20	PC-30	TOTAL
Compression à 7 jours (100X200mm)	3	3	3	3	3	15
Compression à 28 jours (100X200mm)	3	3	3	3	3	15
Compression à 90 jours (100X200mm)	3	3	3	3	3	15
Traction à 7 jours (70X70X280mm)	3	3	3	3	3	15
Traction à 28 jours (70X70X280mm)	3	3	3	3	3	15
Traction à 90 jours (70X70X280mm)	3	3	3	3	3	15
Porosité (70X70X50mm)	2	2	2	2	2	10
Absorption capillaire (70X70X50mm)	2	2	2	2	2	10
<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>110</b>

### 3.2 Caractérisation des bétons à l'état frais

L'ajout des fibres dans le béton affecte la maniabilité et la densité du béton frais. Cet effet dépend du type de fibre ajoutée. Quel que soit le type de fibres, leur introduction dans les mélanges améliore toujours la cohésion et réduit ainsi l'ouvrabilité (Lee Hoang, 2013).

#### **3.2.1 La consistance :**

Les résultats des tests de l'ouvrabilité des différents mélanges sont présentés le Tableau 3.4

**Tableau 3.4.**L'ouvrabilité des différents mélanges.

Type de béton	Affaissement (mm)	Classe selon NFP 18-451
<b>OC</b>	120	Très plastique
<b>AC-20</b>	100	Très plastique
<b>AC-30</b>	110	Très plastique
<b>PC-20</b>	115	Très plastique
<b>PC-30</b>	110	Très plastique

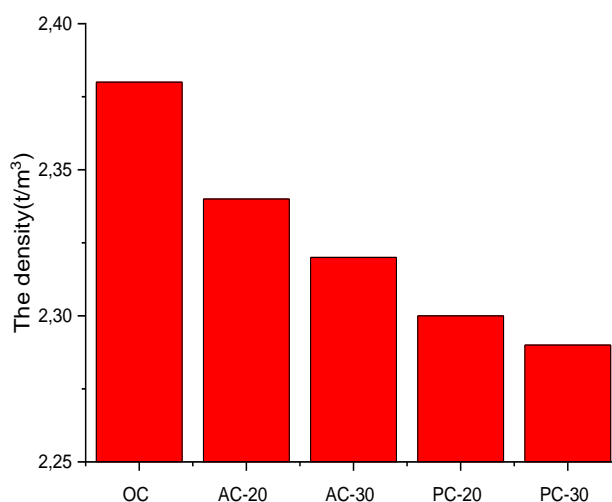
Les résultats sont obtenus selon la norme NFP18-451. Ils montrent une diminution légère de l'affaissement des bétons fibrés, qui est plus importante pour les bétons



renforcés de fibres d'alfa, ceci est dû à la porosité élevée des fibres elle-même. Malgré leur imprégnation dans l'eau avant le gâchage, les fibres d'alfa continuent encore à absorber une partie de l'eau de gâchage lors de la confection du mélange, ce qui réduit l'ouvrabilité du béton. En effet, une diminution de l'ouvrabilité est plus remarquée pour le béton AC-20 que pour le béton AC-30, ceci peut s'expliquer par la quantité de l'eau dans les fibres AF mouillé, les fibres d'Alfa avec la longueur de 30 mm ayant plus d'eau que les fibres d'Alfa avec longueur de 20 mm, cela conduit à une diminution négligeable de l'ouvrabilité du béton avec l'ajout de fibres d'Alfa de 30mm de longueur par rapport à l'ajout de fibre d'Alfa de 20mm de longueur.

### **3.2.2 La densité :**

La densité des différents bétons étudiés est donnée par la figure 3.2.



**Figure 3.2.** La densité des différents des bétons OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30.

Les résultats obtenus montrent que :

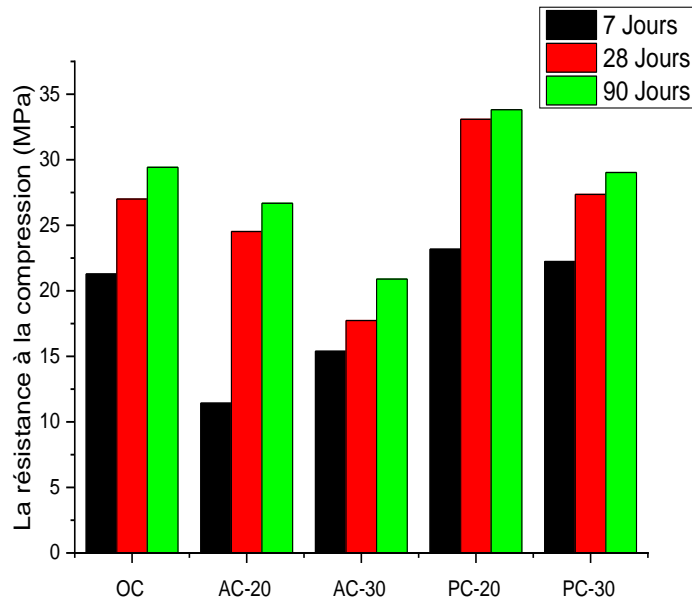
- L'ajout des fibres dans le béton influence sur la masse volumique du béton, ce qui confirme que le béton devient plus léger. La diminution de la densité s'explique par la légèreté des fibres (Yermak, 2017; Khelifa, 2016; Söylev, 2014).
- Le béton fibré devient plus léger avec l'augmentation de la longueur des fibres.

### 3.3. Caractérisation des bétons à l'état durci

#### 3.3.1 Les performances mécaniques :

##### 3.3.1.1. Résistance à la compression simple :

La résistance à la compression simple des différents bétons confectionnés en fonction du temps est donnée par la Figure 3.3.



**Figure 3.3** La résistances à la compression des différents mélanges

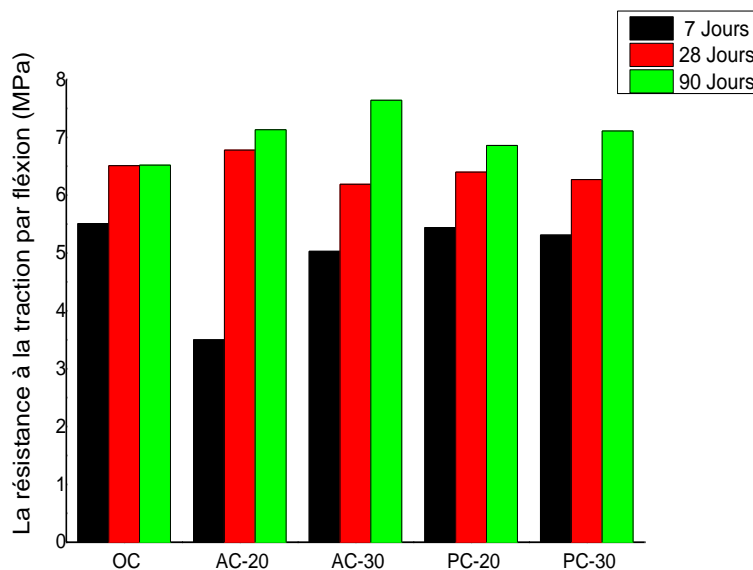
D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- La résistance à la compression des bétons étudiés augmente régulièrement avec l'âge. Le béton renforcé de fibres de polypropylène donne les meilleurs résultats comparé aux bétons renforcés de fibres d'alfa, qui possèdent les résistances les plus faibles mais qui restent dans la fourchette des résistances d'un béton de structure conformément la norme EN 206-1. Ces résultats confirment les études faites sur des bétons renforcés de fibres végétales dont les résistances à la compression diminuent légèrement lors de l'incorporation des fibres plus particulièrement à court terme, et ce, a cause de la cellulose contenue dans l'alfa qui agit comme un retardateur de la prise du ciment (Sedan, 2007).
- La résistance à la compression simple des bétons renforcés de fibres de longueur 20 mm (AC-20 et PC-20) est supérieure à celle des bétons renforcés de fibres de longueur 30mm (AC-30 et PC-30). La différence des résistances

de l'AC-20 et l'AC-30 est de l'ordre de 15% et celle des résistances du PC-20 et du PC-30 est de l'ordre de 10%.

### 3.3.1.2. Résistance à la traction par flexion :

La résistance à la traction par flexion est donnée en fonction du temps par la Figure 3.4.



**Figure 3.4.** Les résistances à la traction par flexion des différents mélanges

On remarque une augmentation de la résistance à la traction par flexion avec l'incorporation des fibres, plus particulièrement celles de l'alfa. L'augmentation de la longueur des fibres donne de meilleures résistances à la traction par flexion comparé aux autres bétons. La résistance de l'AC-30 augmente de 17% comparée à celle du OC à 90 jours.

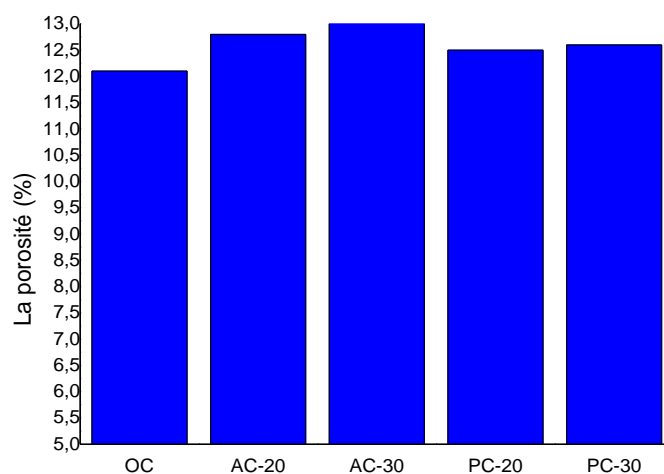
Les fibres améliorent la résistance à la traction du béton et par conséquent réduisent la propagation de fissuration. Cette amélioration de la résistance à la traction est due à l'effet de couture de la fibre dans la matrice.

### **3.3.2 Les performances physiques**

#### **3.3.2.1. La porosité**

La figure 3.5 représente les résultats de l'essai de la porosité des différents bétons. Les résultats montrent que la porosité des bétons AC-20 et AC-30 est supérieure à celle d'autres bétons. Cette augmentation de la porosité est due à l'augmentation de la porosité des fibres d'alfa elles-mêmes qui provoque l'augmentation du volume des vides dans le composite.

Les résultats montrent aussi que la porosité des bétons renforcés par des fibres de longueur 30mm est supérieure à celle des bétons renforcés par des fibres de longueur 20 mm. Les porosités des bétons AC-30 et PC-30 sont respectivement de 13.3% et 12.7% tandis que, les bétons AC-20 et PC-20 ont des porosités respectives de 12.8 % et 12.4 %.

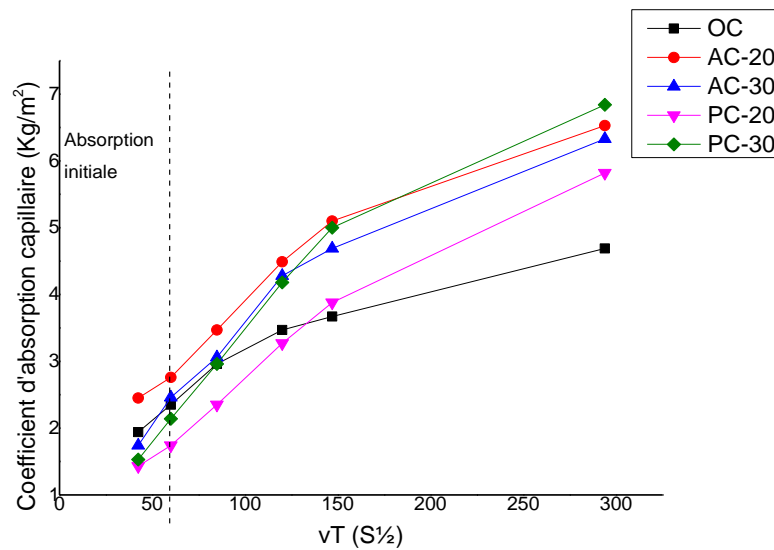


**Figure 3.5** La porosité des différents mélanges étudiés.

#### **3.3.2.2. L'absorption capillaire :**

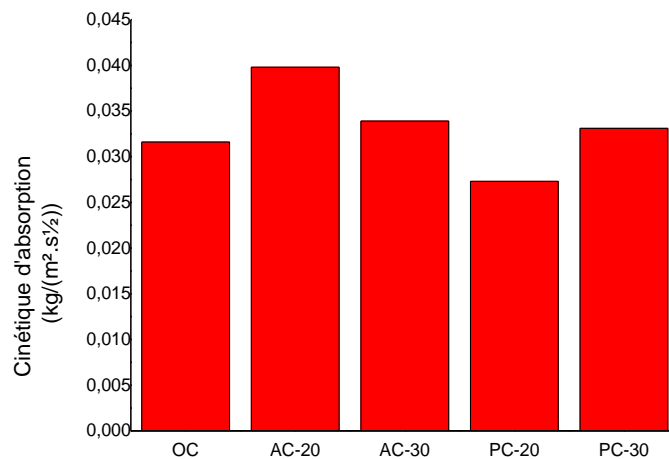
La figure 3.6 présente les résultats de la cinétique d'absorption exprimée en masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps des différents mélanges. Les résultats montrent que la cinétique d'absorption des différents bétons fibrés augmente d'une façon significative en fonction de temps comparé de béton sans fibres. En effet, on remarque deux parties de courbe, une partie située entre 0 et 1h ( $60 \text{ s}^{1/2}$ ) qui caractérise le remplissage des plus gros pores et la

deuxième partie au-delà de 1h qui caractérise le remplissage des pores les plus fins (Rabehi ; 2014).



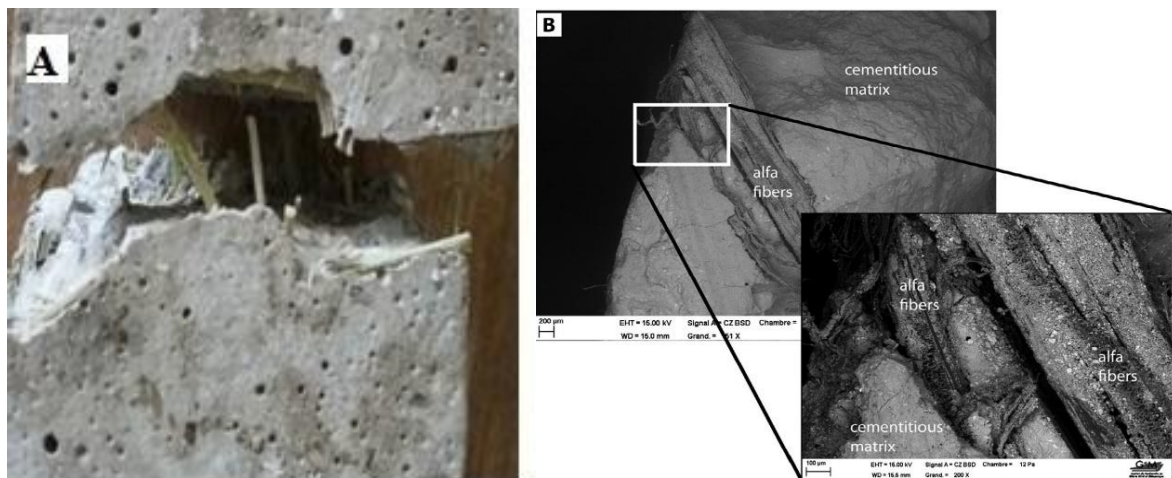
**Figure 3.6.** L'absorption d'eau par capillarité des différents mélanges étudiée

Le coefficient d'absorption des bétons renforcés de fibres d'alfa est supérieurs à celui du béton renforcé de fibres de polypropylènes et du béton témoin (Figure 3.7), à cause de l'incorporation des fibres d'Alfa qui modifient le réseau poreux du matériau en augmentant le diamètre des pores (Bessa, 2004), ce qui engendre une porosité supplémentaire à l'interface fibres/matrice cimentaire comme le montre la figure 3.8. L'influence des fibres des fibres de polypropylène sur le coefficient d'absorption capillaire du béton est moindre que celle des fibres d'alfa comme le montre la figure 3.7.



**Figure 3.7.** Cinétique d'absorption des mélanges étudiés

On remarque aussi que l'absorption capillaire de l'AC-20 est légèrement inférieure à celle de l'AC-30, elle est de l'ordre de 0.0398(kg/(m².s<sup>1/2</sup>)) pour le AC-20 et de l'ordre de 0.0340(kg/(m².s<sup>1/2</sup>)) pour le AC-30.



**Figure 3.8.** Interface fibre Alfa/ matrice cimentaire :

(A) l'observation à l'œil nu. (B) image MEB (Khelifa,2 017 ;Khelifa et al ,2016).

### 3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la formulation et la caractérisation des différents bétons confectionnés pour étudier l'effet de la nature des fibres et de leurs longueurs

## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés

(20 et 30 mm) sur les caractéristiques physico-mécaniques à l'état frais et à l'état durci, des bétons de structure, plus particulièrement celui des fibres d'alfa.

Cette étude nous a permis de faire les conclusions suivantes :

- L'incorporation des fibres d'alfa dans le béton diminue son ouvrabilité à cause de la porosité élevée de ces fibres.
- L'affaissement de béton diminuée en augmentant la longueur des fibres, plus particulièrement pour les bétons renforcés de fibres d'alfa.
- La résistance à la compression diminue légèrement pour les bétons fibrés, en particulier lorsqu'on augmente la longueur des fibres, ceci est dû à l'augmentation du volume des vides et la diminution de la compacité du mélange.
- La résistance à la flexion augmente pour les bétons fibrés particulièrement lorsque ces dernières sont plus longues. L'AC-30 a donné les meilleurs résultats.

## **Chapitre 4 : Comportement des bétons face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à- vis l'ASE**



## Chapitre 4 : Comportement des bétons face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'ASE

### 4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés au comportement des bétons confectionnés face à l'élévation de la température et leur durabilité vis-à-vis l'attaque sulfatique externe, et plus particulièrement l'influence de la longueur des fibres sur le comportement et la durabilité de ces mélanges.

### 4.2. Comportement des bétons face à l'élévation de la température

#### 4.2.1. Les propriétés physiques

##### 4.2.1.1. Perte de masse

Les masses de chaque échantillon de béton ont été prises avant et après chaque cycle. La perte de masse sous élévation de la température est due à la décomposition des agrégats calcaires, la libération du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et à l'écaillage de la surface du béton, ce qui contribue à la modification des propriétés mécaniques du béton comme le montre la littérature (Dügenci et al, 2015 et Ma et al , 2015).

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure 4.1.

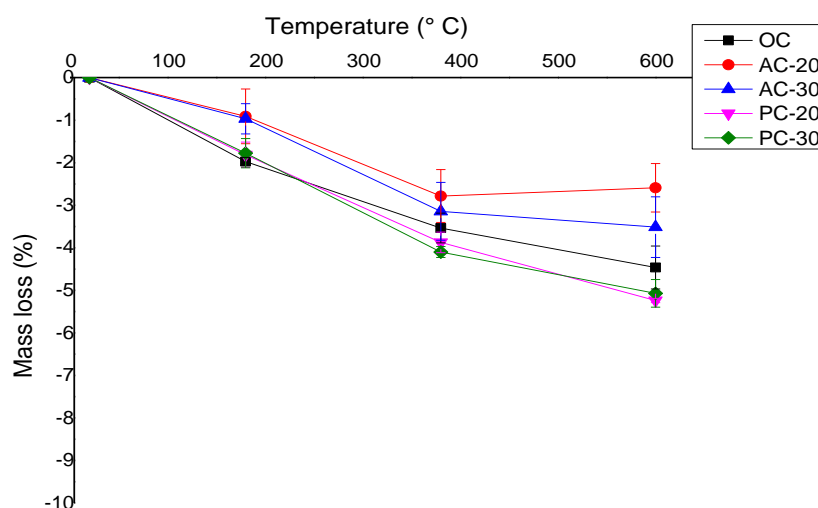


Figure 4.1. Perte de masse des bétons étudiés en fonction de la température.

La masse de tous les bétons diminue en fonction des cycles chauffage/refroidissement. On distingue trois différentes phases dans les courbes de la figure 4.1.

Dans la première phase (20 – 180°C), l'évolution de la perte de masse des bétons renforcés de polypropylène et du béton ordinaire est similaire, elle est plus importante que celle des bétons renforcés de fibres d'alfa, qui ont pratiquement la même évolution, cela est dû à la quantité d'eau présente dans chaque béton (Tableau 3.1) qui a été déterminée à partir de la perte de masse à 180°C. En effet, cette différence entre les différentes pertes de masses des différents bétons, s'explique par le fait que les fibres d'alfa absorbent une partie de l'eau pendant la préparation du mélange, ce qui réduit la quantité d'eau libre.

**Tableau 4.1** Teneur en eau libre dans les différents bétons

<b>Béton</b>	<b>w (%)</b>
<b>OC</b>	1,97
<b>AC-20</b>	0,90
<b>AC-30</b>	0,97
<b>PC-20</b>	1,76
<b>PC-30</b>	1,81

On remarque que durant la deuxième phase, l'évolution de la perte de masse suit pratiquement la même pente, tandis que dans la troisième phase, la masse des bétons renforcés de fibres d'alfa semble se stabilisée contrairement à celle des trois bétons restants qui continue à diminuer. La différence de la pente entre les deux bétons renforcés de fibres de polypropylène et le béton ordinaire est d'environ 0,5 %, cette différence s'explique par une vaporisation partielle ou totale des fibres de polypropylène. Des résultats similaires ont été montrés par Pliya (Pliya, 2010), l'auteur montre que l'addition de fibres de PP dans le béton ne conduit pas à un changement dans la cinétique de la perte de masse avec la température.

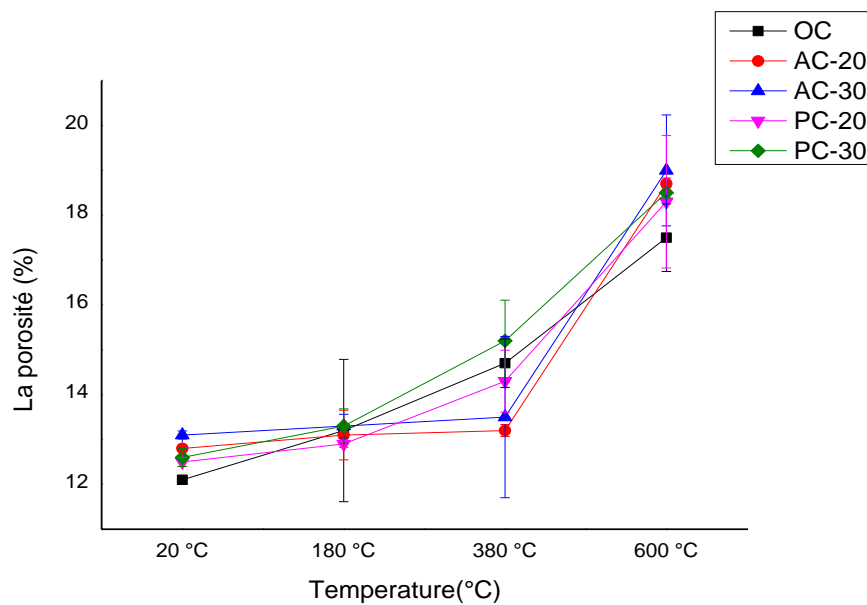
Entre 380 et 600°C les bétons renforcés de fibres d'alfa se caractérisent par une diminution de la perte de masse, qui correspond à la dégradation thermique de la

lignine et aux résidus résultants de la décomposition des principaux composants au cours de la deuxième phase, la lignine se dégrade aux environs de 420°C (Khelifa, 2017).

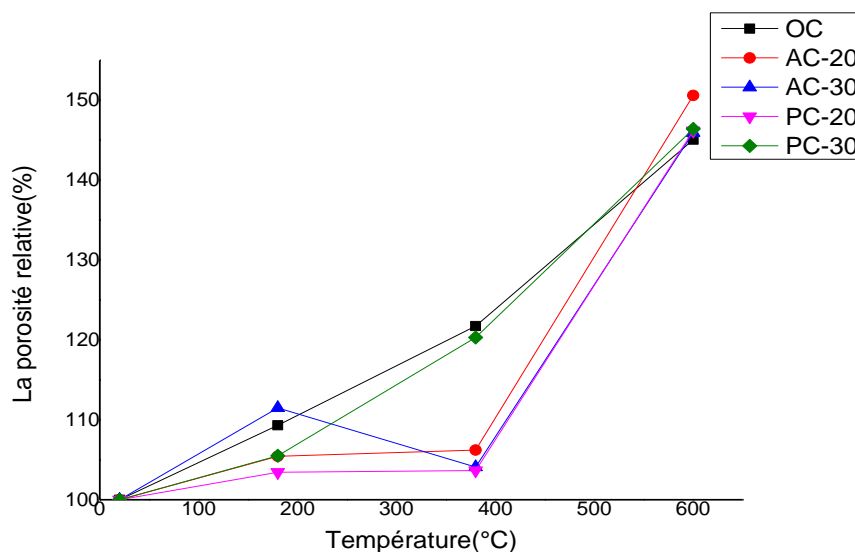
On remarque aussi que la perte de masse est proportionnelle à la longueur des fibres, plus la longueur des fibres est importante, plus la perte de masse est importante.

#### 4.2.1.2. La porosité

Les figures 4.2 et 4.3 montrent respectivement l'évolution de la porosité absolue et l'évolution de la porosité relative des bétons étudiés en fonction de la température.



**Figure 4.2.** Evolution de la porosité absolue en fonction de la température.



**Figure 4.3.** Evolution de la porosité relative en fonction de la température.

La porosité des bétons étudiés (Figure 4.3) augmente en fonction de la température de chauffage. La porosité des bétons renforcés de fibres de polypropylène et du béton ordinaire croît plus rapidement que celle du béton AC.

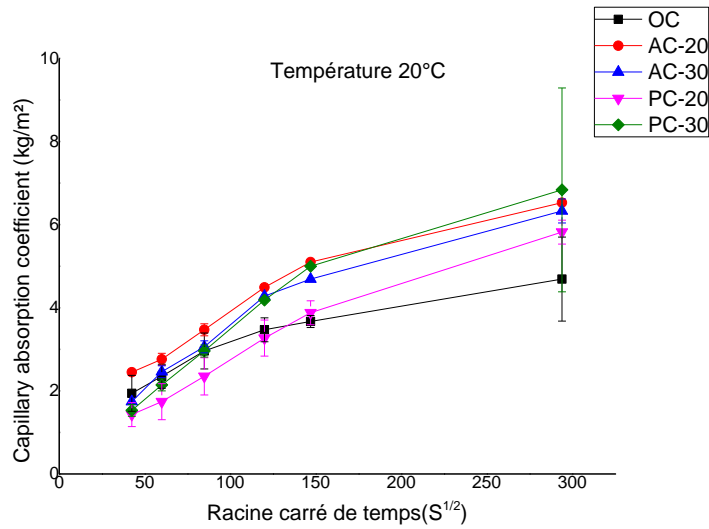
Entre 180°C et 380°C, Nous enregistrons une augmentation de 20 % de la porosité des bétons renforcés de fibres de polypropylène et du béton ordinaire, quant-à celle des bétons renforcés de fibres d'alfa, elle n'a augmenté que de 5 %. Entre 380 et 600°C, la porosité des bétons renforcés de fibres d'alfa a bondi de 45%, cette augmentation est due à la fusion des fibres d'alfa, qui conduit à la formation d'une porosité supplémentaire dans le béton.

Plus la longueur des fibres augmente, plus la porosité est importante, cela est dû à l'effet de l'empreinte des fibres dans le mélange qui crée des vides différents et réduit la pression interstitielle dans le béton.

#### **4.2.1.3. Absorption capillaire**

Les résultats de la cinétique d'absorption des différents bétons sont représentés dans les Figure de 4.4 à 4.7. Ces figures représentent l'absorption d'eau par capillarité de différents mélanges de béton en fonction de la température.

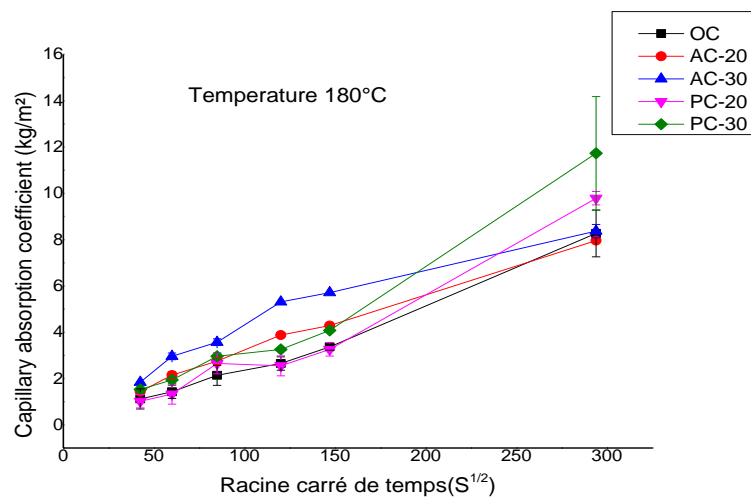
## Étude des performances et de la durabilité des bétons fibrés



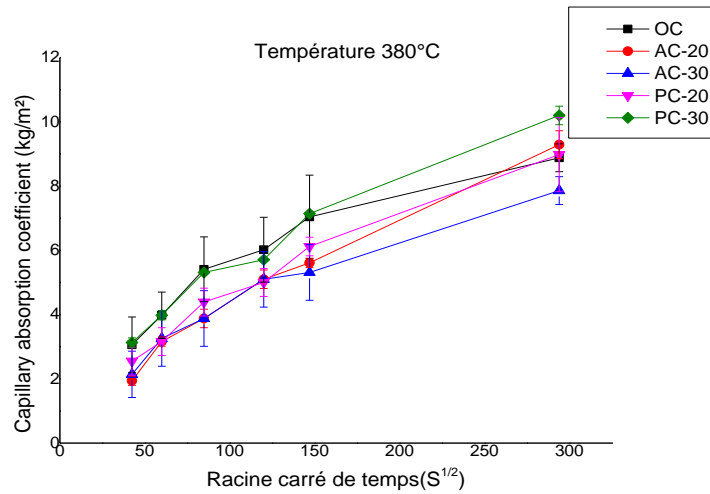
**Figure 4.4.** Absorption d'eau par capillaire à 20°C

Les résultats montrent que le coefficient d'absorption des bétons étudiés augmente avec l'augmentation de la température.

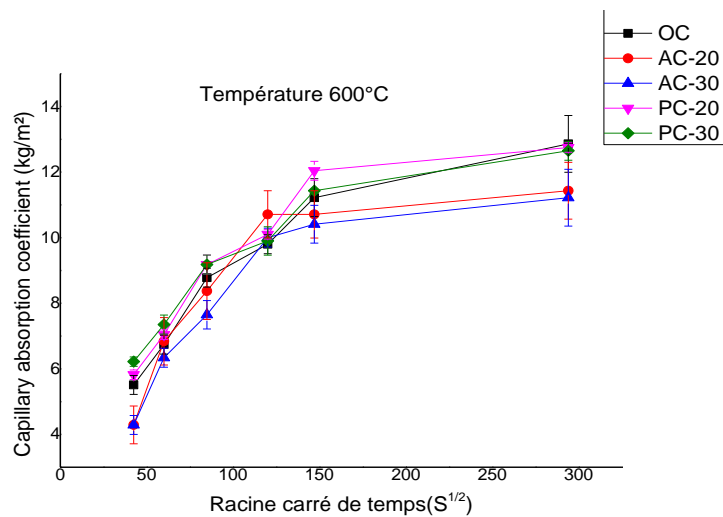
A 20 °C, la cinétique d'absorption des bétons renforcés de fibres d'alfa est plus élevée que celle du béton ordinaire et des bétons renforcés de polypropylène. (Figure 4.4), à cause de la porosité élevée du béton AC par rapport aux autres bétons.



**Figure 4.5.** Absorption d'eau par capillaire à 180°C

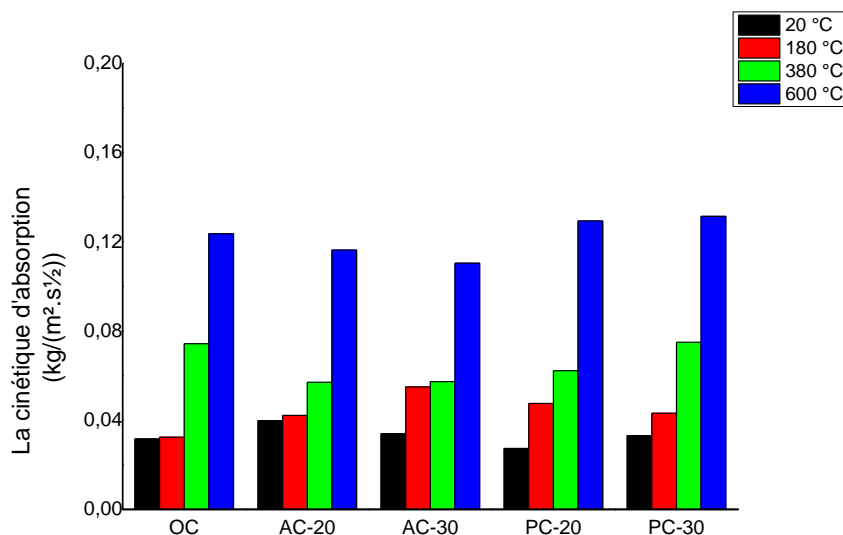


**Figure 4.6.** Absorption d'eau par capillaire à 380°C



**Figure 4.7.** Absorption d'eau par capillaire des bétons à 600°C

A 180°C, on remarque une assez faible variation de l'absorption pour OC et AC-20 qui est d'environ 3% pour OC et 6% pour l'AC-20 par rapport à l'absorption initiale tandis que l'absorption des bétons restants, elle augmente d'une manière plus significative. De 380 à 600°C, l'évolution de la cinétique d'absorption est à peu près similaire pour tous les bétons étudiés (figure 4.6).



**Figure 4.8** La cinétique d'absorption des bétons en fonction de la température.

L'incorporation de fibres d'alfa dans le béton, lorsqu'elle est soumise à une température élevée, influe positivement sur la cinétique d'absorption et réduit la fissuration.

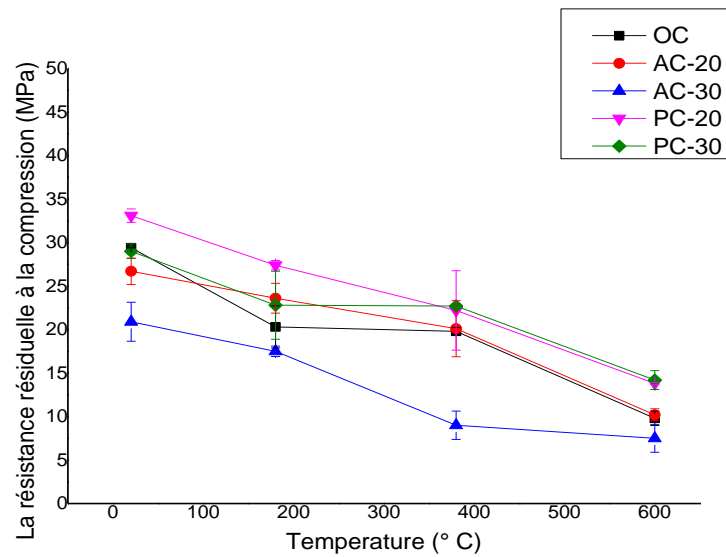
#### ***4.2.2 Les propriétés mécaniques***

##### **4.2.2.1. La résistance à la compression**

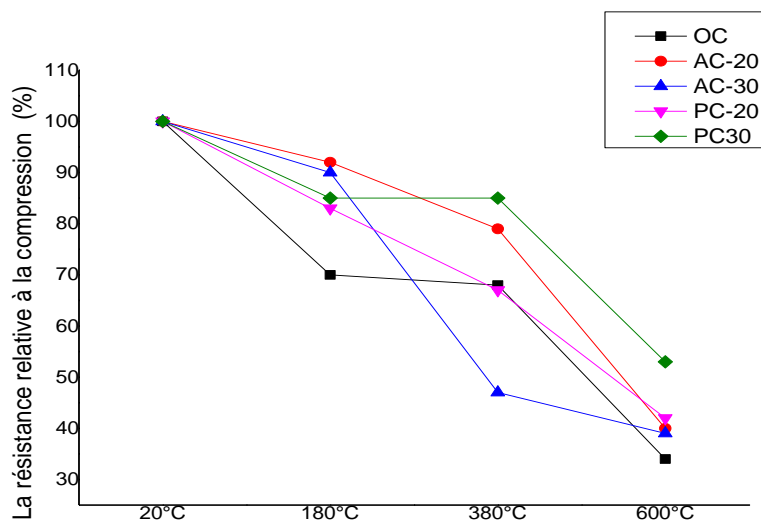
La diminution de la résistance à la compression sous élévation de la température est due aux fissures radiales à l'interface pâte-granulats résultant de l'inadéquation de la contrainte thermique entre les agrégats, qui se dilatent et la pâte qui se rétrécit, comme le confirme la littérature (Yermak et al, 2017; Xing et al, 2015 ; Pliya, 2010; Chen, 2009 et Hager,2004).

La variation de la résistance à la compression des bétons étudiés en fonction de la température est représentée dans la figure 4.9.

Les résistances résiduelles ont été comparées aux résistances initiales (voir Figure 10).



**Figure 4.9.** Evolution de la résistance résiduelle à la compression des bétons en fonction de la température.



**Figure 4.10.** Evolution des résistances relatives à la compression des bétons en fonction de la température

Les résultats montrent que la résistance en compression pour tous les bétons étudiés diminue avec l'augmentation de la température. Le comportement des bétons vis-à-vis de la compression simple suit deux phases différentes comme le confirme la littérature (Diederichs, 1992, Phan, 2001, Kanéma, 2007 et Pliya, 2010). La première phase



représente une légère diminution de la résistance, entre la température ambiante et 380°C, quant-à la deuxième phase, elle est caractérisée par une plus importante diminution de la résistance entre 380 et 600°C.

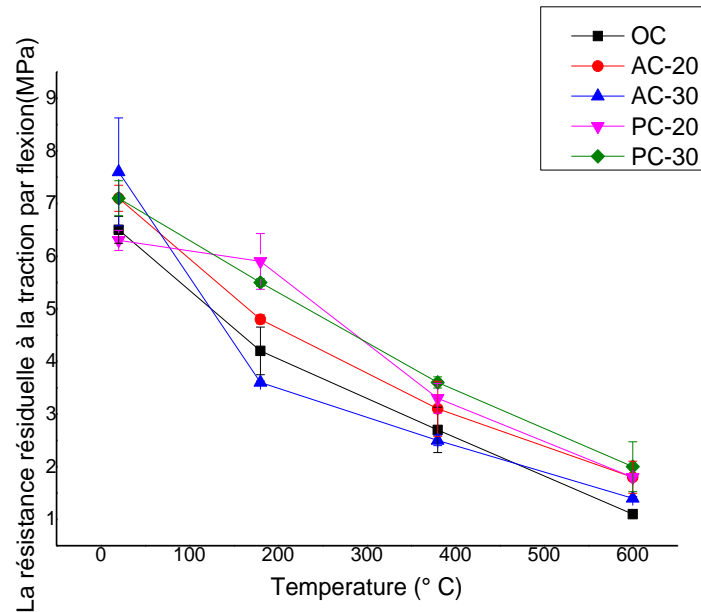
Durant la première phase on remarque :

- une diminution de la résistance pour tous les bétons entre 20 et 180°C, cette diminution plus accentuée pour le OC et les PC. La diminution de la résistance des bétons renforcés par des fibres de polypropylène dû probablement à la fusion de ces fibres provoquant des pores supplémentaires. Les AC présentent une légère diminution de la résistance à la compression, notamment celle de l'AC-20 qui est de 10%.
- une diminution plus importante que celle remarquée entre 20 et 180°C a été observée entre 180 et 380°C. Elle est respectivement de 25% et 55% pour l'AC-20 et l'AC-30, ce qui est dû à la décomposition des fibres d'alfa. Une légère diminution de la résistance de 1% pour OC et PC-30 et 8% pour le PC-20 a été observée entre 180 et 380°C.

Au-delà de 380°C, les pertes de résistance sont presque similaires pour tous les bétons quelque soit la longueur de leurs fibres. Une diminution de la résistance est observée pour tous les bétons, elle comprise entre 60% et 70% pour les bétons OC, PC et AC-20. Contrairement aux autres bétons, AC-30 subit une perte de résistance moins de 50%.

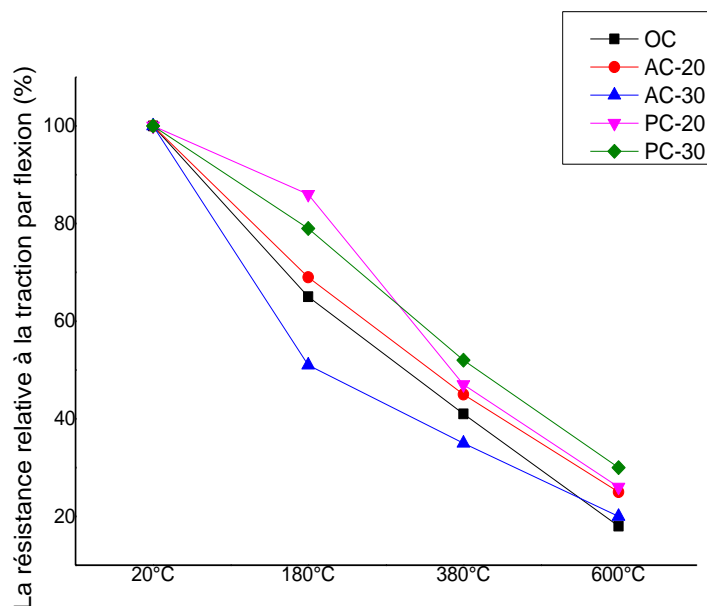
#### **4.2.2.2. La résistance à la traction par flexion**

La variation de la résistance à la traction par flexion des bétons étudiés en fonction de la température est représentée par figure 4.11, et l'évolution des résistances relatives des bétons par la figure 4.12.



**Figure 4.11.** Evolution de la résistance résiduelle à la traction par flexion des bétons en fonction de la température

Une diminution progressive de la résistance du béton sous élévation de température est observée (figure 4.11). Les AC perdent plus de résistance que les PC; néanmoins, leurs résistances restent plus élevées que celles du OC. Une diminution importante de la résistance à la traction des bétons fibrés en fonction de la température est due à la décomposition et la dégradation des fibres d'alfa pour les AC (Figure 4.13) et à la fusion des fibres de polypropylène pour les PC (Lee, Han et al. 2012, Sideris and Manita, 2013). Ainsi, les canaux laissés par les fibres créent un réseau de pores plus conjonctif et diminuent la pression de la vapeur interne (Sideris and Manita ,2013).



**Figure 4.12.** Evolution des résistances relatives à la traction par flexion des mélanges de béton en fonction de la température

Entre 20 et 180 ° C nous remarquons une diminution de la résistance plus élevée pour les AC et OC que pour les PC, cette diminution par rapport à leur résistance initiale est successivement de 16%, 32% et 35% pour les PC, AC et OC. Entre 180°C et 380°C, une diminution de la résistance est observée pour tous les bétons OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30, respectivement de 58 %, 54%, 63%, 47% et 52% par rapport à celles mesurées à température ambiante.

Dans les deux phases, la diminution de la résistance est plus importante pour les bétons renforcés des fibres de 30 mm que celle des bétons renforcés de fibres de 20 mm ; cette diminution fait est causée par la création de pores supplémentaires suite à la dégradation des fibres dans cette phase. Les pores supplémentaires varient selon la nature et la taille des fibres, ils dépendent du taux de fibres utilisé dans le mélange. La longueur des fibres joue effectivement un rôle important dans l'évolution de la résistance à la traction, elle évite la détérioration interne du béton.

Après chauffage à 600°C, tous les bétons diminuent de résistance à la traction qui diminue de près de 80% pour tous les bétons.

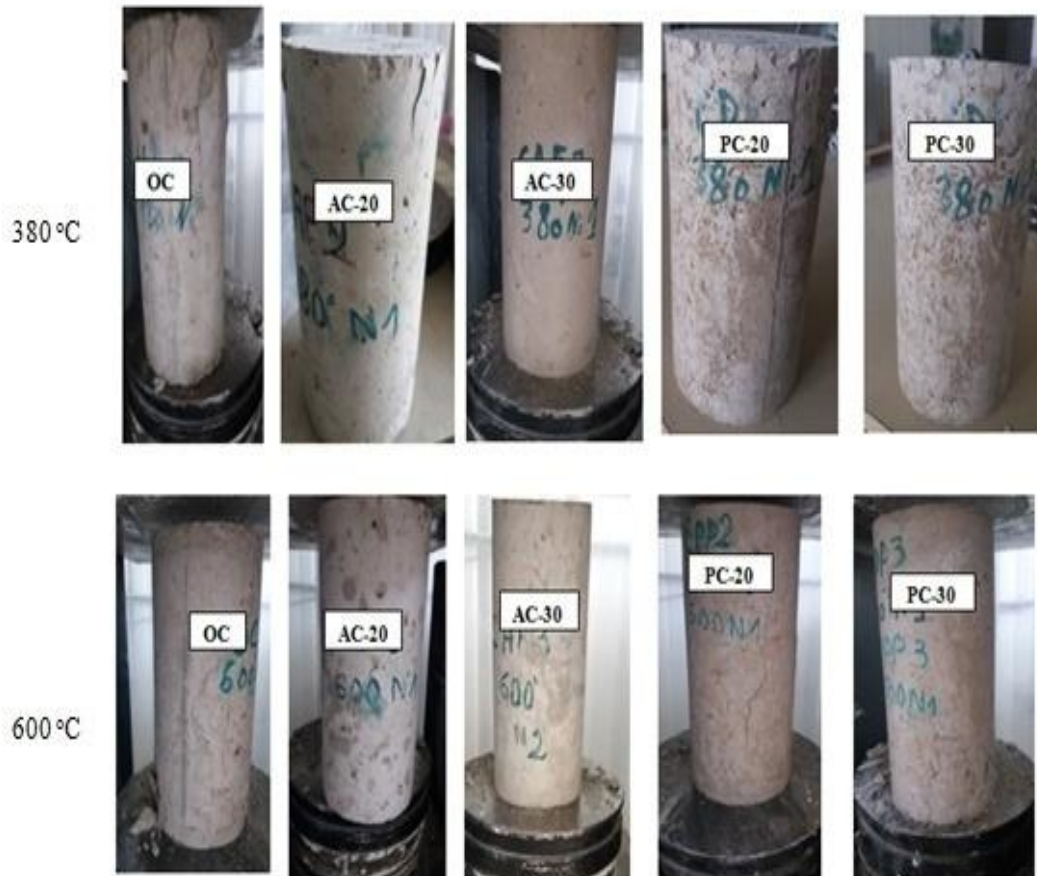


**Figure 4.13.** Fusion et la combustion de la fibre d'alfa à 600°C

#### **4.2.3. Comportement à la rupture du béton**

Les effets de l'ajout des fibres sur le comportement à la rupture du béton après une exposition de l'élévation de la température sont représentés par les Figures 4.13 et 4.14.

L'ajout des fibres entraîne une diminution de l'apparition des fissurations du béton, ce qui se traduit par l'amélioration de la résistance à la compression des bétons fibrés à haute température.



**Figure 4.14.** Comportement à la rupture des différents bétons après exposition à des températures comprise entre 380 et 600°C.

### 4.3. Comportement des bétons face à l'attaque sulfatique externe

#### 4.3.1. Suivi de la variation de masse

Les Figures 4.15 et 4.16 représentent le suivi de masse en fonction du temps des échantillons immergés complètement dans une solution dosée à 5% de sulfates de sodium.

On observe une augmentation de masse pour tous bétons. Elle est attribuée à la continuité de la formation des hydrates, du gypse et de l'ettringite secondaire suite à une réaction entre les hydrates et les sulfates de la solution (Tebbal, 2017).

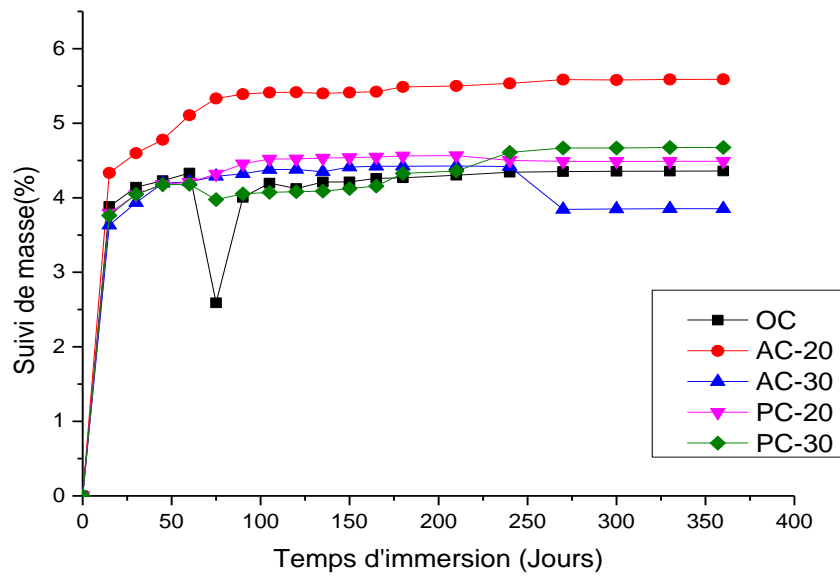


Figure 4.15. Suivi de masse des bétons immergés pendant une année

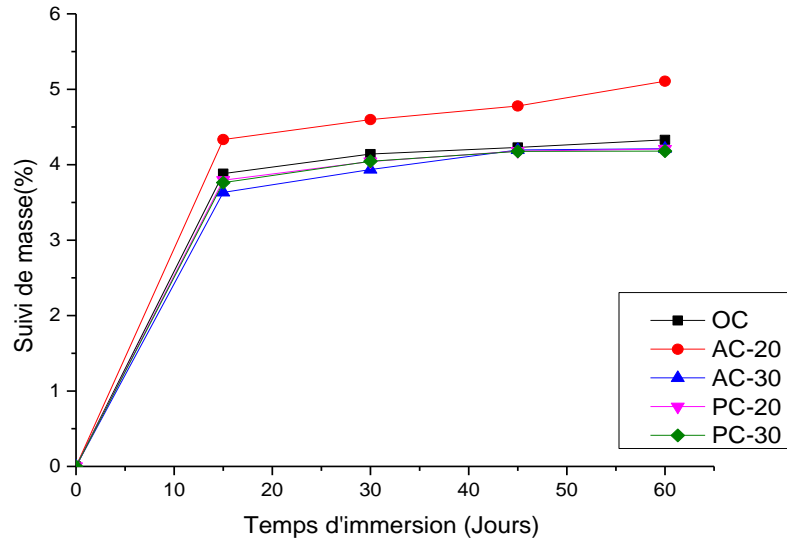
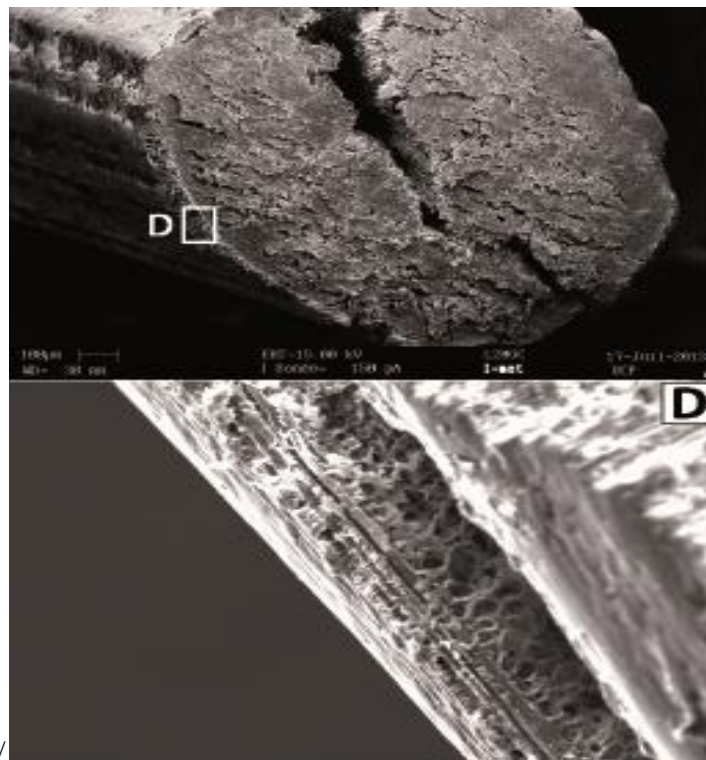


Figure 4.16. Suivi de masse des bétons immergés de 0 à 60 jours

L'incorporation des fibres dans le béton conduit à la formation des pores capillaires longeant le réseau des fibres (Laifa et al, 2014).

Le béton renforcé de fibres d'alfa AC-20 présente un gain de masse plus important que celui des autres bétons ; il enregistre un gain de masse final de l'ordre de 4.5% à 60 jours. Cela peut s'expliquer par la nature de la fibre d'Alfa caractérisée par une forte d'absorption d'eau (figure 4.17).



**Figure 4.17** Observation au MEB de la fibre d'Alfa (Khelifa, 2017)

On enregistre un gain de masse final à l'ordre de 5.6 et 3.9 % successivement pour le béton AC-20 et le béton AC-30 à 360 jours.

De 240 à 270 jours, le béton AC-30 subit une perte de masse avant de se stabiliser de 270 à 360 jours.

De 0 à 135 jours, on peut remarquer que le gain de masse du béton renforcé par des fibres de longueur de 20mm est supérieure à celle du béton renforcé par des fibres avec longueur de 30mm, elle est de l'ordre de 5.400% et 4.533% successivement pour le béton AC-20 et PC-20, est de l'ordre de 4,348% et 4,089% pour le béton successifs AC-30 et PC-30.

### 4.3.2. Variation de la résistance à la compression

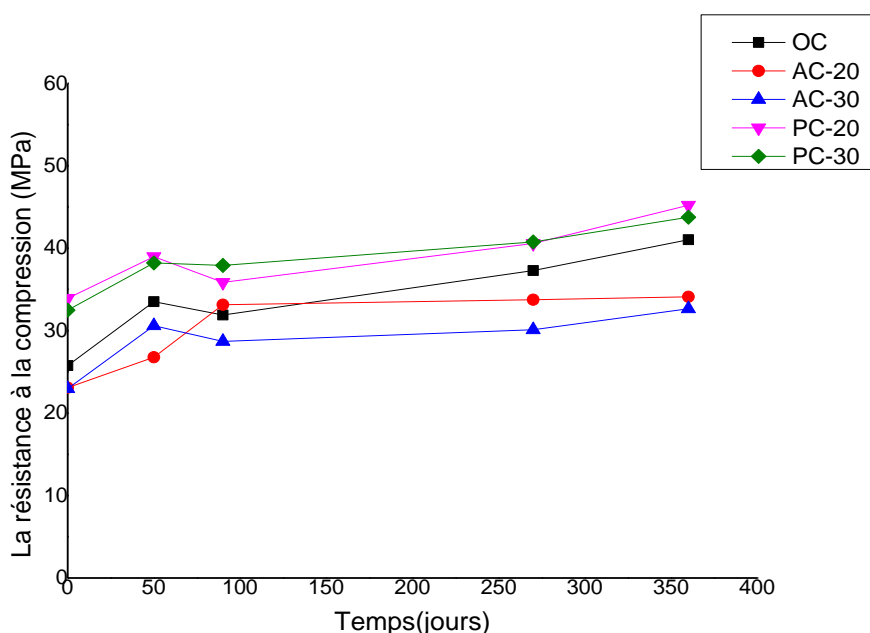
La résistance à la compression des échantillons (7X7X7 cm) immergés dans la solution saline, a été mesurée aux échéances : 50, 90, 270 et 360 jours.

Le nombre d'échantillons testés pour l'évolution de la résistance à la compression simple fonction de temps d'immersion est donné par le Tableau 4.2

**Tableau 4.2** Le nombre d'échantillons testés à la résistance à la compression fonction de temps d'immersion

Type de béton	OC	AC-20	AC30	PC-20	PC-30	TOTAL
Nombre des échantillons	15	15	15	15	15	75

La figure 4.18 montre l'évolution des résistances à la compression des échantillons de béton en fonction de la durée d'immersion dans une solution 5 % de sulfate de sodium.



**Figure 4.18.** Evolution des résistances à la compression en fonction de la durée d'immersion.



D'après une analyse des résultats obtenus, on remarque que :

- De 0 à 45 jours, les résistances à la compression des bétons OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30 augmentent respectivement de 30% ,16%, 33%, 15% et 18%.
- Entre 45 et 90 jours, les résistances à la compression des échantillons de béton immergés diminuent légèrement de 4%, 6%,8% 1% respectivement pour le OC, AC-30, PC-20 et PC-30 et augmente de 24% l'AC-20.
- Entre 3 mois à 9 mois, on enregistre une légère augmentation de la résistance à la compression pour tous les échantillons de béton OC, AC-20, AC-30, PC-20 et PC-30 respectivement de 9% ,7%, 3%, 14% et 8%.
- Au-delà de 9mois d'immersion et jusqu'à la fin du protocole choisi, les résistances à la compression de échantillons continuent d'augmenter très légèrement. Nous avons enregistré une augmentation à l'ordre de 17% pour le OC, 2 % pour le AC-20, 5% pour le AC-30, 14% pour le PC-20 et 7 % pour le PC-30. L'effet des fibres n'améliorent généralement pas les résistances à la compression du béton.
- La résistance obtenue à la fin du protocole de l'immersion complète indique que tous les bétons étudiés ont bien résisté à l'attaque sulfatiques externe tout en restant au-dessus d'un béton de structure de classe 25/30. Les résistances à la compression à 360 jours sont de 41 MPa pour l'OC, 34 MPa pour l'AC-20, 33 MPa pour l'AC-30, 45 MPa pour le PC-20 et 44 MPa pour le PC-30.

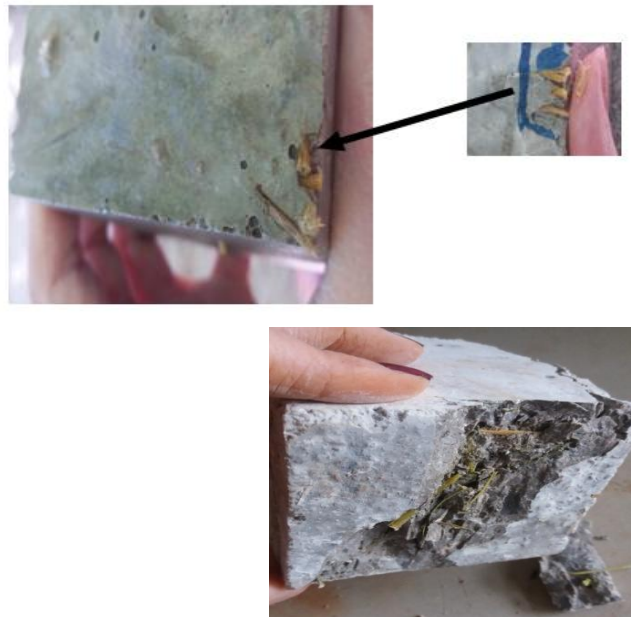
#### ***4.3.3. L'observation macroscopique (à l'œil nu) :***

D'après la figure 4.19, il n'ya pas de gonflement ni de fissuration visibles à l'œil nu pour tous les échantillons et donc pas de signe d'attaque sulfatique externe importante.

Peut de dégradation superficielle au niveau des arrêtes pourrait indiquer un début d'attaque sulfatique externe au-delà de 360 jours.



**Figure 4.19** Photo des échantillons après une année d'immersion complète



**Figure 4.20.** Echantillon de béton renforcé de fibres d'alfa après une année d'immersion complète dans une solution dosée à 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

#### **4.4. Conclusion**

Sur la base des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

##### **4.4.1. Pour la durabilité de béton sous l'élévation de la température**

- Le béton renforcé de fibres d'alfa a une résistance à la compression résiduelle légèrement inférieure à celle du béton renforcé par des fibres de polypropylène, mais elle reste supérieure à celle d'un béton ordinaire non fibré.
- Après élévation de la température, le béton AC-20 est celui qui se comporte mieux vis-à-vis de la résistance à la traction résiduelle.
- La porosité des bétons renforcés de fibres de polypropylène augmente plus rapidement que les bétons renforcés de fibres d'alfa après élévation de température.
- Les fibres d'alfa de longueur 20 mm offrent la meilleure résistance à la compression au béton à très haute température.
- Les fibres réduisent l'écaillage et la rupture explosive sous une charge de compression, elles augmentent la ductilité du béton.

##### **4.4.2. Pour l'attaque sulfatique externe :**

- Les résultats obtenus indiquent une légère augmentation de la masse des échantillons suite à leur immersion dans la solution saline.
- Le béton fibré AC-20 présente des résistances légèrement supérieures à celles des bétons fibrés AC-30, d'où l'impact négatif de la longueur des fibres sur la durabilité des bétons. La longueur optimale des fibres est de 20 mm.

Compte tenu de tous ces résultats, on peut conclure que les fibres Alfa peuvent être utilisées pour renforcer le béton et améliorer son comportement à haute température, aussi bien que les fibres de polypropylène, d'où leur impact positif sur l'environnement.

## **Conclusion générale & perspectives**

## Conclusion générale et perspectives

### 5.1. Conclusion générale

Nous avons étudié l'effet de la longueur des fibres sur les performances mécaniques et la durabilité des bétons renforcés de fibres sous élévation de la température et soumis à l'attaque sulfatique externe.

Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

#### 5.1.1. Sur la caractérisation des bétons fibrés

- L'incorporation des fibres, notamment les fibres d'alfa, dans le béton entraîne une diminution de l'ouvrabilité du béton qui est proportionnelle la longueur des fibres.
- La résistance à la compression des bétons diminue légèrement avec l'incorporation des fibres d'alfa. Elle diminue encore avec l'augmentation de la longueur des fibres.
- Les résultats obtenus sur les résistances à la traction par flexion des bétons montrent une amélioration des résistances à la traction pour les bétons fibrés et notamment les bétons renforcés de fibres d'Alfa.
- Les bétons renforcés par des fibres de 30 mm de longueur donnent les meilleures résistances à la traction.

#### 5.1.2. Sur la durabilité des bétons fibrés

##### 5.1.2.1. Sous élévation de la température

- Le béton renforcé de fibres d'alfa perd moins de masse que le béton ordinaire et les bétons renforcés de fibres de polypropylène.
- La perte de masse pour les bétons renforcés de fibres d'alfa n'excède pas les 4%.
- L'incorporation des fibres d'alfa dans les bétons se comporte mieux vis-à-vis de l'élévation de la température grâce à porosité plus importante de ses bétons comparés aux bétons renforcés de polypropylène.
- L'incorporation des fibres de 20 mm de longueur dans le béton, notamment les fibres d'alfa, réduit le taux de perte de résistances à la compression.

#### **5.1.2.2. Face à l'attaque sulfatique externe**

- Aucun endommagement n'a été observé pour tous nos échantillons immergés dans la solution de sulfates.
- Les gains de résistance à la compression montrent qu'il n'y a pas eu d'attaque sulfatique externe par immersion complète des échantillons.
- L'incorporation des fibres d'alfa de longueur 20 mm dans le béton entraîne une amélioration de la durabilité face à l'attaque sulfatique externe.

On peut conclure que l'utilisation de fibres d'alfa dans le renforcement des bétons de structure peut remplacer l'utilisation des fibres de polypropylène. Elles améliorent leur durabilité sous élévation de la température et face à l'attaque sulfatique externe

#### **5.2. Perspectives**

A l'issue de cette étude, des perspectives peuvent être recommandées pour des études futures :

- Effectuer des observations microscopiques à fin de renforcer nos conclusions.
- Effectuer des essais supplémentaires sur la fibre d'alfa pour mieux comprendre son comportement vis-à-vis l'élévation de la température et de l'attaque sulfatique externe.
- Par ailleurs, nous avons remarqué un effet positif de l'ajout des fibres d'Alfa sur la stabilité thermique du béton. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la porosité après la température 380°C, cela peut favoriser le phénomène de pénétration des agents agressifs, ce qui réduit la durée de vie de la structure. Il sera donc intéressant d'étudier la durabilité des bétons renforcés par des fibres d'Alfa sous l'agression sulfatique après sollicitation thermique.

## **Références bibliographiques**

## Références Bibliographiques

NF EN 1097-2. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques de granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation."

NF EN 1097-3. "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire."

NF EN 12390-3. "Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes."

NF EN 12390-5. "Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes."

NF EN 197-1:EN, N. (2001). 197-1-Ciment—Partie 1: composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants. AFNOR, Paris.

NF EN 933-8+A1. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable."

NF EN 933-9+A1. "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines - Essai au bleu de méthylène."

NF P18-404. "Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes." AFNOR.

NF P18-459 Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique. Mars 2010.

NFP 18-451. (2007). Consistance et Ouvrabilité des bétons a l'aide du Cône d'Abrams.

NFP 18-560 Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.

Abrams, M. S. (1971). Compressive Strength Of Concrete At Temperatures To 1,600 F (Pp. 33-58). Portland Cement Association.



Ahmed, S. A. (2013). "Properties and mesostructural characteristics of linen fiber reinforced self-compacting concrete in slender columns." *Ain Shams Engineering Journal* 4(2): 155-161.

Albert, N. (2013). *Comportement Des Bétons Ordinaire Et A Hautes Performances Soumis A Haute Température: Application A Des Eprouvettes De Grandes Dimensions* (Doctoral Dissertation, Cergy-Pontoise).

Ali, M., Li, X., &Chouw, N. (2013). Experimental Investigations On Bond Strength Between Coconut Fibre And Concrete. *Materials & Design*, 44, 596-605.

Awwad, E., M. Mabsout, B. Hamad, M. T. Farran And H. Khatib (2012). "Studies On Fiber-Reinforced Concrete Using Industrial Hemp Fibers." *Construction And Building Materials* 35: 710-717.

Bahloul, O., Bourzam, A., &Bahloul, A. (2009, October).Utilisation Des Fibres Végétales Dans Le Renforcement De Mortiers De Ciment (Cas De L'alfa). In 1st International Conference On Sustainable Built Environment Infrastructures In Developing Countries, Enset Oran.

Baroghel-Bouny, V. (1994). *Caractérisation Microstructurale Et Hydrique Des Pâtes De Ciment Et Des Bétons Ordinaires Et A Très Hautes Performances* (Doctoral Dissertation).

Baron. J., Ollivier J.P. (1996). "Les Bétons – Bases Et Données Pour Leur Formulation", Éditions Eyrolles.

Baroghel-Bouny, V. (1994). *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons- Méthodes, analyse, interprétations.*

Baste T., Bouffard M., Horlait C., Lacroix R., Marcellin S., Oliveira T., Béton et Environnement, Projet IFIPS S2, Université Paris-Sud 11, 2008.

Bazant, Z. P., Kaplan, M. F., &Haslach, H. W. (1997). Concrete At High Temperatures: Material Properties And Mathematical Models. *Appliedmechanicsreviews*, 50, B75-B75.

Bessa-Badreddine A. (2004). Étude De La Contribution Des Additions Minérales Aux Propriétés Physiques, Mécaniques Et De Durabilité Des Mortiers, Thèse De Doctorat, Université De Cergy-Pontoise, France.

Brahim, S. B., & Cheikh, R. B. (2007). Influence Of Fibre Orientation And Volume Fraction On The Tensile Properties Of Unidirectional Alfa-Polyester Composite. *Composites Science And Technology*, 67(1), 140-147.

C. Castella C., Les Différentes Observations Au Microscope Electronique A Balayage Dans Le Cadre Des Expertises Des Pathologies Du Béton, Rapport Interne Lcpc, France (2011), 36p

C. Yu, W. Sun, Scrivener K, Mechanism Of Expansion Of Mortars Exposed In Sodium Sulphate Solutions, *Cement And Concrete Research*, 43 (2013) 105–111.

Chen, J.-K., J. Chen, G. Thomas, S. C. Kozma And R. C. Harris (2009). "S6 Kinase 1 Knockout Inhibits Uninephrectomy-Or Diabetes-Induced Renal Hypertrophy." *American Journal Of Physiology-Renal Physiology* 297(3): F585-F593.

Consolazio, G. R., Mcvay, M. C., & Rish Iii, J. W. (1997). Measurement And Prediction Of Pore Pressures In Cement Mortar Subjected To Elevated temperature. In *Proceedings of The International Workshop On Fire Performance Of High-Strength Concrete*, NIST, Gaithersburg, Maryland. (pp. 125-148).

Cours De Génie Civil «Durabilité Et Réparation Du Béton», Gci-714, Université De Sherbrooke, Canada, Internet, 2008.

Dallel, M. (2012). Evaluation Du Potentiel Textile Des Fibres D'alfa (Stipa Tenacissima L.): Caractérisation Physico-Chimique De La Fibre Au Fil (Doctoral Dissertation, université de Haute Alsace-Mulhouse).

Dejong, M. J., & Ulm, F. J. (2007). The Nanogranular Behavior Of Csh At Elevated Temperatures (Up To 700 C). *Cement And Concrete Research*, 37(1), 1-12.

Diederichs, U., Jumppanen, U.M., High Temperature Properties And Spalling Behaviour Of High-Strength Concrete, *Verlog Für Architektur Und Techn. Wissencheften*, Ernst & Schn, 1992, Pp. 191-197.

Do Thi, V. V. (2011). Matériaux Composites A Fibres Naturelles/Polymère Biodégradables Ou Non (Doctoral Dissertation).

Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveau Guide Du Béton Et De Ses Constituants. 8th Edition, Eyrolles, Paris, France,

Düğenci, O., Haktanir, T., Altun, F., 2015. Experimental Research For The Effect Of High Temperature On The Mechanical Properties Of Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Constr. Build. Mater.* 75, 82e88."

E.F. Irassar, V.L. Bonavetti, M. González, Microstructural Study Of Sulfate Attack On Ordinary And Limestone Portland Cements At Ambient Temperature, *Cement And Concrete Research*, 33 (2003) 31-41.

El Hilali, A. (2009). Etude Expérimentale De La Rhéologie Et Du Comportement Des Bétons Autoplaçants (Bap): Influence Des Fines Calcaires Et Des Fibres Végétales (Doctoral Dissertation, Cergy-Pontoise).

Fibres et renforts végétaux Solutions composites, Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France, 2012

Ghrici M., Kenai S., Mansour M. S., Kadri E. «Some Engineering Properties Of Concrete Containing Natural Pozzolana And Silica Fume», *Journal Of Asian Architecture And Building Engineering*, November 2006.

Ghrici M., Kenai S., Meziane E. «Mechanical And Durability Properties Of Cement Mortar With Algeria, Natural Pozzolana», Springer Science + Business Media, Llc 2005

Glasser, F. P., J. Marchand And E. Samson (2008). "Durability Of Concrete— Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions." *Cement And Concrete Research* 38(2): 226-246.

Hager, I. (2004). Comportement A Haute Température Des Bétons A Haute Performance: Evolution Des Principales Propriétés Mécaniques (Doctoral Dissertation, École Nationale Des Ponts Et Chaussées (France)).

Hammoud, R. (2013). Loi Constitutive Chimio-plastique Pour Le Béton Exposé Aux Hautes Températures (Doctoral Dissertation, École Polytechnique De Montréal).

Handoo, S. K., Agarwal, S., & Agarwal, S. K. (2002). Physicochemical, Mineralogical, And Morphological Characteristics Of Concrete Exposed To Elevated Temperatures. *Cement And Concrete Research*, 32(7), 1009-1018.

Hansen, T. C. (1986). Physical structure of hardened cement paste. A classical approach. *Materials and Structures*, 19(6), 423-436.

Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., & Furumura, F. J. S. P. (1972). Strength, Elasticity And Thermal Properties Of Concrete Subjected To Elevated Temperatures. *Special Publication*, 34, 377-406.

Harmathy, T. (1965). Effect Of Moisture On The Fire Endurance Of Building Elements. In *Moisture In Materials In Relation To Fire Tests*. Astm International.

Higgins, D. D., & Crammond, N. J. (2003). Resistance Of Concrete Containing Ggbs To The Thaumasite Form Of Sulfate Attack. *Cement And Concrete Composites*, 25(8), 921-929.

Holmer S., Vahan A., transition zones studies of vegetable fibre-cement paste composites, Elsevier, *Cement and concrete composites*, Vol. 21, pp. 49-57, 1999

Horkoss, S., Lteif, R., & Rizk, T. (2011). Influence Of The Clinker  $So_3$  On The Cement Characteristics. *Cement And Concrete Research*, 41(8), 913-919.

ITM-SST 1551.1 Etude De Stabilité Au Feu A L'aide D'une Approche Performancielle, 2012

Joseph, P. V., Joseph, K., Thomas, S., Pillai, C. K. S., Prasad, V. S., Groeninckx, G., & Sarkissova, M. (2003). The Thermal And Crystallisation Studies Of Short Sisal Fibre Reinforced Polypropylene Composites. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 34(3), 253-266.

Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). High-Temperature Behaviour Of Hpc With Polypropylene Fibres: From Spalling To Microstructure. *Cement And Concrete Research*, 31(10), 1487-1499.

Kalifa, P., F.-D. Menneteau And D. Quenard (2000). "Spalling And Pore Pressure In Hpc At High Temperatures." *Cement And Concrete Research* 30(12): 1915-1927.

Kawamata, A., Mihashi, H., & Fukuyama, H. (2000). Flexural Failure Properties Of Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites. In *Proceedings Of Aij Tohoku Chapter Architectural Research Meeting* (Vol. 63, Pp. 69-72).

Khelifa M. R., Effet De L'attaque Sulfatique Externe Sur La Durabilité Des Bétons Autoplaçants, Thèse De Doctorat En Génie Civil, Ecole Polytechnique De L'université D'Orléans, 2009.

Khelifa, M. R. (2017). Formulation Et Caractérisation D'éco-Bétons Renforcés Aux Fibres D'alfa Pour Des Bâtiments Verts Et Durables (Doctoral Dissertation, Cergy-Pontoise).

Khelifa, M. R., Leklou, N., Bellal, T., Hebert, R. L., & Ledesert, B. A. (2016). Is Alfa A Vegetal Fiber Suitable For Making Green Reinforced Structure Concrete?. *European Journal Of Environmental And Civil Engineering*, 22(6), 686-706

Kim, J., & Lee, G. P. (2015). Evaluation Of Mechanical Properties Of Steel-Fibre-Reinforced Concrete Exposed To High Temperatures By Double-Punch Test. *Construction And Building Materials*, 79, 182-191.

Komonen, J., & Penttala, V. (2003). Effects Of High Temperature On The Pore Structure And Strength Of Plain And Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes. *Fire Technology*, 39(1), 23-34.

Kriker, A., Debicki, G., Bali, A., Khenfer, M. M., & Chabannet, M. (2005). Mechanical Properties Of Date Palm Fibres And Concrete Reinforced With Date Palm Fibres In Hot-Dry Climate. *Cement And Concrete Composites*, 27(5), 554-564.

Laifa, W., Behim, M., Turatsinze, A., & Ali-Boucetta, T. (2014). Caractérisation D'un Béton Autoplaçant Avec Addition De Laitier Cristallisé Et Renforcé Par Des Fibres De Polypropylène Et De Diss. *Synthèse: Revue Des Sciences Et De La Technologie*, 29(1), 100-110.

Le Hoang, T. (2013). Etude De Caractérisation Du Comportement De Composites Cimentaires Incorporant Des Fibres Courtes De Lin (Doctoral Dissertation, Caen).

Le Roux, A., & Orsetti, S. (2000). Les Réactions Sulfatiques: Conditions De Formation, Structure Et Expansion Des Minéraux Secondaires Sulfatés. Bulletin-Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, 41-50.

Lea, C., & Gomer, R. (1971). Energy Distribution In Field Emission From Krypton Covered Tungsten. The Journal Of Chemical Physics, 54(8), 3349-3359.

Lewis G., Premalal M., Natural Vegetable Fibres As Reinforcement In Cement Sheets, Magazine Of Concrete Research, Volume 31, Issue 107, Pp. 104-108, 1979

Li, M., Qian, C., & Sun, W. (2004). Mechanical Properties Of High-Strength Concrete After Fire. Cement And Concrete Research, 34(6), 1001-1005.

M. Collepari, "A State Of The Art Review On Delayed Ettringite Attack On Concrete", Cement And Concrete Composites, 25, 2003, Pages 401-407.

Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical Properties Of Concrete At High Temperature—A Review. Construction And Building Materials, 93, 371-383.

Maghchiche, A., Haouam, A., & Immirzi, B. (2013). Extraction And Characterization Of Algerian Alfa Grass Short Fibers (Stipatenacissima). Chemistry & Chemical Technology, (7, № 3), 339-344

Martins, M. A., & Joekes, I. (2003). Tire Rubber–Sisal Composites: Effect Of Mercerization And Acetylation On Reinforcement. Journal Of Applied Polymer Science, 89(9), 2507-2515

Massaad, G., Rozière, E., Loukili, A., & Izoret, L. (2017). Do The Geometry And Aggregates Size Influence External Sulfate Attack Mechanism?. Construction And Building Materials, 157, 778-789.

Mazaheripour, H., S. Ghanbarpour, S. Mirmoradi And I. Hosseinpour (2011). "The Effect Of Polypropylene Fibers On The Properties Of Fresh And Hardened

Lightweight Self-Compacting Concrete." *Construction And Building Materials* 25(1): 351-358.

Menou, A. (2004). *Etude Du Comportement Thermomécanique Des Bétons A Haute Température.: Approche Multi Echelles De L'endommagement Thermique* (Doctoral Dissertation, Pau).

Moranville-Regourd, M. (1992). *Microstructure Des Betons Ahautes Performances. Les Betons A Hautes Performances*, Eds: Y. Malier. Presses De L'enpc, Paris, 25-44.

Neville, A. (2004). "The Confused World Of Sulfate Attack On Concrete." *Cement And Concrete Research* 34(8): 1275-1296.

Nguyen, L. H. (2013). *Béton De Structure A Propriétés D'isolation Thermique Améliorées: Approche Expérimentale Et Modélisation Numérique* (Doctoral Dissertation, Cergy-Pontoise).

Noumowe, A. (1995). *Effet De Hautes Températures (20-600 C) Sur Le Béton: Cas Particulier Du Béton A Hautes Performances* (Doctoral Dissertation, Lyon, Insa).

Noumowe, A. (2005). *Mechanical Properties And Microstructure Of High Strength Concrete Containing Polypropylene Fibers Exposed To Temperatures Up To 200 C.* *Cement And Concrete Research*, 35(11), 2192-2198.

Oujai, S., & Shanks, R. A. (2005). *Composition, Structure And Thermal Degradation Of Hemp Cellulose After Chemical Treatments.* *Polymerdegradation And Stability*, 89(2), 327-335.

Ozerkan, N. G., Ahsan, B., Mansour, S., & Iyengar, S. R. (2013). *Mechanical Performance And Durability Of Treated Palm Fiber Reinforced Mortars.* *International Journal Of Sustainable Built Environment*, 2(2), 131-142.

Pacheco-Torgal, F. And S. Jalali (2011). "Cementitious Building Materials Reinforced With Vegetable Fibres: A Review." *Construction And Building Materials* 25(2): 575-581.

Page, J. (2017). Formulation Et Caractérisation D'un Composite Cimentaire Biofibré Pour Des Procédés De Construction Préfabriquée (Doctoral Dissertation, Normandie université).

Page, J., Boutouil, M., Khadraoui, F., & Gomina, M. (2015). Etude Des Propriétés Mécaniques D'un Béton Renforce Par Des Fibres De Lin. In Conférence Internationale Francophone NoMaD, Mines Douai, France (pp. 1-10).

Phan, L. T., Lawson, J. R., & Davis, F. L. (2001). Effects Of Elevated Temperature Exposure On Heating Characteristics, Spalling, And Residual Properties Of High Performance Concrete. *Materials And Structures*, 34(2), 83-91.

Planel, D. (2002). Les Effets Couplés De La Précipitation D'espèces Secondaires Sur Le Comportement Mécanique Et La Dégradation Chimique Des Bétons (Doctoral Dissertation, Université De Marne-La-Vallée).

Pliya, P. (2010). Contribution Des Fibres De Polypropylène Et Métalliques A L'amélioration Du Comportement Du Béton Soumis A Une Température Elevée. Cergy: Thèse De Doctorat De L'université De Cergy-Pontoise.

Quenee, B., Ammouche, A., Carde, C., Rafai, N., & Moulin, I. (2013). La Durabilité Et Le Cycle De Vie Des Bétons. *Travaux (Paris)*, (898), 28-35.

Barbarulo, R; Peycelon, H; Leclercq, S. Chemical Equilibria Between C–S–H And Ettringite, At 20 And 85 °C, *Cement And Concrete Research*, 37 (2007) 1176-1181.

Ramaswamy H. S; Ahuja, B M; Krishnamoorthy S. Behaviour Of Concrete Reinforced With Jute, Coir And Bamboo Fibres, *International Journal Of Cement Composites And Lightweight Concrete*, Volume 5, Issue 1, Pp. 3-13, 1983.

Ranjani, G. I. S., & Ramamurthy, K. (2012). Behaviour Of Foam Concrete Under Sulphate Environments. *Cement And Concrete Composites*, 34(7), 825-834.

Regourd, M., & L'hydratation du ciment Portland, L. (1982). Le béton hydraulique. Chapitre «L'eau», Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 59-68.



Rokbi, M., & Osmani, H. (2011). L'effet Des Traitements De Surface Des Fibres Sur Les Propriétés Mécaniques De Composites Polyester-Fibres Alfa. In Congrès Français De Mécanique. Afm, Maison De La Mécanique, 39/41 Rue Louis Blanc, 92400 Courbevoie, France (Fr).

RILEM Recommendations, 200-HTC. 2007. "Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical Concrete Properties at High Temperatures—modelling and Applications." *Materials and Structures* 40(9):841–53.

Rozière, E., Loukili, A., El Hachem, R., & Grondin, F. (2009). Durability Of Concrete Exposed To Leaching And External Sulphate Attacks. *Cement And Concrete Research*, 39(12), 1188-1198.

Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Mechanism Of Sulfate Attack: A Fresh Look: Part 2. Proposed Mechanisms. *Cement And Concrete Research*, 33(3), 341-346.

Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Scrivener, K., Rentsch, D., & Figi, R. (2008). A Thermodynamic And Experimental Study Of The Conditions Of Thaumassite Formation. *Cement And Concrete Research*, 38(3), 337-349.

Sedan, D., C. Pagnoux, A. Smith And T. Chotard (2007). "Propriétés Mécaniques De Matériaux Enchevêtrés A Base De Fibre De Chanvre Et Matrice Cimentaire." 18ème Congrès Français De Mécanique (Grenoble 2007).

Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., & Chotard, T. (2008). Mechanical Properties Of Hemp Fibre Reinforced Cement: Influence Of The Fibre/Matrix Interaction. *Journal Of The European Ceramic Society*, 28(1), 183-192.

Skalny, J., & Pierce, J. S. (1998, October). Sulphate Attack Issues. In Seminar On Sulphate Mechanisms, Quebec City, Quebec, Canada.

Söylev, T. A., & Özturan, T. (2014). Durability, Physical And Mechanical Properties Of Fiber-Reinforced Concretes At Low-Volume Fraction. *Construction And Building Materials*, 73, 67-75.

Tebbal, N. (2017). Effet De La Nature Des Granulats Sur Les Propriétés Physico-Mécaniques Et Durabilité D'un Béton A Haute Performance (Doctoral Dissertation, Université De M'sila).

Touloum, N., & Brara, A. (2014). Evidence Of Thaumasite Formation In A Newly Built Concrete Structure In Northeastern Algeria. *Algérie: Innovation Et Valorisation En Génie Civil Et Matériaux De Construction*, 343-348.

Wang, J. G. (1994). Sulfate Attack On Hardened Cement Paste. *Cement And Concrete Research*, 24(4), 735-742.

Xing .Z, Beaucour. A.-L Hebert. R, Noumowe A, Ledesert B, Aggregate's Influence On Thermophysical Concrete Properties At Elevated Temperature, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 18–28.

Xing, Z. (2011). Influence De La Nature Minéralogique Des Granulats Sur Leur Comportement Et Celui Du Béton A Haute Température (Doctoral Dissertation).

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics Of Hemicellulose, Cellulose And Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788.

Yermak, N. (2015, May). Comportement A Hautes Températures Des Bétons Additionnés De Fibres.

Yermak, N., Pliya, P., Beaucour, A. L., Simon, A., & Noumowé, A. (2017). Influence Of Steel And/Or Polypropylene Fibres On The Behaviour Of Concrete At High Temperature: Spalling, Transfer And Mechanical Properties. *Construction And Building Materials*, 132, 240-250.