

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

---

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques.**

---

Présentée par : **Sami ZIANE**

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

Soutenue le 06 / 07 / 2020

### Devant le Jury

Pr Beroual Ahmed	Université Frères Mentouri, Constantine 1	Président
Pr Khelifa Mohammed-Rissel	Université Batna 2	Rapporteur
Pr Boudaoud Zeineddine	Université Larbi Ben M'hidi -Oum El Bouaghi	Examineur
Pr Benouis Abdelhalim	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Dr Guemmadi Zhor	Université Frères Mentouri, Constantine 1	Examineur
Dr Abdou Kamel	Université Frères Mentouri, Constantine 1	Examineur
Pr Guetteche Mohamed Nacer	Université Frères Mentouri, Constantine 1	Invité

## **Remerciements**

**Louange à Dieu, le Tout Puissant qui m'a donné la force et le courage d'effectuer ce modeste travail.**

Un grand merci à mes parents, ma sœur et mes frères d'avoir été là pour moi, qu'Allah me les garde.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de thèse Pr. Mohammed-Rissel KHELIFA, pour la confiance qu'il m'a témoignée, pour avoir accepté de diriger ma thèse ainsi que pour ses encouragements.

Mes vifs remerciements et mon profond respect au Pr. Ahmed Beroual, de l'université des Frères Mentouri Constantine 1, qui a accepté de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Pr. Zeineddine Boudaoud de l'université Larbi Ben M'hidi d'Oum-El-Bouaghi, Pr. Abdelhalim Benouis de l'université du 8 Mai 1945 de Guelma et Dr. Zhor Guemmadi de l'université des Frères Mentouri Constantine 1, de m'avoir honoré de leur présence en acceptant de faire partie du Jury de ma soutenance, et d'avoir accepté d'expertiser mes travaux de recherche.

Je remercie vivement Dr. Kamel Abdou, qui a accepté d'examiner mon travail malgré ses nombreux engagements en tant que chef du département de génie civil. Dr. Kamel Abdou a été présent le long de mon cursus doctoral et n'a jamais hésité à m'apporter toute son aide à tous les niveaux.

Un grand merci au Pr. Mohamed-Nacer Guetteche, qui malgré ses occupations, a accepté de faire partie du Jury de ma soutenance et d'examiner mes travaux de recherche.

Je tiens également à remercier Dr. Mezhoud Samy de l'université des Frères Mentouri Constantine 1, pour son aide et ses conseils judicieux durant la rédaction et la traduction de mes articles.

Je tiens aussi à remercier mes amis et mes collègues et plus particulièrement mon ami Saber Medaoud doctorant au département de génie civil à l'université Ferhat Abbas Setif 1.

**و الحمد لله رب العالمين**

## **Résumé**

Les structures en béton sont souvent exposées à des milieux agressifs à cause de la pollution atmosphérique à laquelle elles sont exposées ou celle des terrains sur lesquels ces structures sont construites. Ces pollutions peuvent être naturelles comme la construction sur des terrains gypseux ou industriels comme le déversement de produits chimiques dans l'atmosphère ou dans les rivières et les terres, comme c'est le cas des sulfates qui peuvent provoquer l'expansion, la fissuration et la ruine des structures en béton.

Différentes fibres ont été incorporées au béton afin d'améliorer ses performances mécaniques et de ce fait, lui conférer une meilleure durabilité. Un regain d'intérêt des chercheurs et des industriels a été constaté depuis quelques années, pour l'utilisation des fibres naturelles et plus particulièrement d'origine végétales, pour le renforcement des bétons en raison de leurs avantages économiques, sociaux et environnementaux.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres végétales (alfa et de chanvre), face aux attaques sulfatiques externes.

Nous avons formulé et confectionné des éprouvettes de différents types de bétons renforcés de fibres d'alfa et de chanvre avec différents dosages, nous les avons ensuite comparé à deux bétons témoins, l'un ordinaire et l'autre renforcé de fibres de polypropylène.

Pour évaluer l'effet des attaques sulfatiques externes, tous les bétons ont été soumis à deux protocoles de vieillissement : 1) une immersion complète dans deux différentes solutions salines dosées à 12,5%, 2) un protocole de vieillissement accéléré sous forme d'une immersion/séchage à 60°C dans les mêmes solutions salines. Deux sulfates ont été utilisés, les sulfates de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et les sulfates de magnésium ( $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ ).

Les différents tests utilisés ont montré que les bétons renforcés de 1% de fibres d'alfa et ceux renforcés de 0.25% de fibres de chanvre ont donné des résultats qui se rapprochent de ceux des bétons ordinaire et de polypropylène.

**Mots clés :** Béton, Fibres, Alfa, Chanvre, polypropylène, performances mécaniques, durabilité, attaques sulfatiques.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Abstract**

Concrete structures are often exposed to aggressive environments because of the air pollution to which they are exposed or that of the land on which they are built. Such pollution can be natural, such as construction on gypsum soils, or industrial, such as the release of chemicals into the atmosphere or into rivers and land, as is the case with sulphates, which can cause concrete structures to expand, crack and ruin.

Different fibers have been incorporated into concrete to improve its mechanical performance and thus give it greater durability. In recent years, researchers and industrialists have shown renewed interest in the use of natural fibers, particularly those of plant origin, for the reinforcement of concrete because of their economic, social and environmental advantages.

The aim of this work is to study the mechanical behavior of concrete reinforced with plant fibers, in this case alfa and hemp fibers, in the face of external sulphate attacks.

We have formulated and manufactured test specimens of different types of concrete reinforced with alfa and hemp fibers with different amount, comparing them with two control concretes, one ordinary and the other reinforced with polypropylene fibers.

In order to evaluate the effect of external sulphate attacks, all the concretes were subjected to two ageing protocols: 1) complete immersion in two different sulphate solutions dosed at 12.5% sulphate, 2) an accelerated ageing protocol in the form of immersion/drying at 60°C in the same sulphate solutions. Two sulphates were used, sodium sulphates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) and magnesium sulphates ( $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ ).

The different tests used showed that concretes reinforced with 1% alfa fibers and those reinforced with 0.25% hemp fibers have shown results similar to those of ordinary concrete and polypropylene..

**Keywords:** Concrete, Fibers, Alfa, Hemp, Polypropylene, mechanical performances, durability, sulfatic attacks.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### ملخص

غالبا ما تتعرض الهياكل الخرسانية لبيئات عدوانية بسبب تلوث الهواء الذي تتعرض له أو التربة التي بنيت عليه هذه الهياكل. يمكن أن يكون هذا التلوث طبيعيا ، مثل البناء على تربة تحتوي على نسبة عالية من الجبس، أو صناعيا مثل تصريف المواد الكيميائية في الغلاف الجوي أو في الأنهار و الأرض ، كما هو الحال مع الكبريتات و التي يمكن أن تسبب التمدد ، التشقق و تخريب الهياكل الخرسانية.

لقد تم دمج ألياف متنوعة في الخرسانة لتحسين أدائها الميكانيكي و بالتالي منحها متانة أفضل. و قد ازداد اهتمام العلماء والباحثين و الصناعيين في السنوات الأخيرة في استخدام الألياف الطبيعية وخاصة ذات الأصل النباتي لدمجها في الخرسانة و هذا بسبب فوائدها الاقتصادية والاجتماعية و البيئية

الهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك الميكانيكي للخرسانة المعززة بالألياف النباتية منها ألياف الحلفاء و القنب في مواجهة هجوم الكبريتات الخارجية.

قمنا بصياغة و تصنيع قطع اختبار لأنواع مختلفة من الخرسانات المدعمة بألياف الحلفاء و القنب بجرعات مختلفة و مقارنة من اثنين من الخرسانة كشواهد ، واحدة عادية والأخرى مدعمة بألياف البولي بروبيلين.

لتقييم تأثير هجوم الكبريتات الخارجية ، تم إخضاع جميع الخرسانات لبروتوكول الشيخوخة : (1) الغمس الكامل في محلول كبريتات الصوديوم بنسبة 12.5 %، (2) بروتوكول الغمس و التجفيف عند حرارة 60 درجة مئوية ، و قد استعملنا نوعين من الكبريتات، كبريتات الصوديوم و كبريتات المغنيزيوم.

أظهرت نتائج الاختبارات المختلفة أن الخرسانة المدعمة بتركيز 1 بالمائة من ألياف الحلفاء و تلك المعززة ب 0,25 بالمائة من ألياف القنب أعطت نتائج قريبة من الخرسانة العادية و الخرسانة المدعمة بألياف البولي بروبيلين.

**الكلمات المفتاحية :** خرسانة ، ألياف ، الحلفاء، قنب البولي بروبيلين، أداء ميكانيكي، متانة، هجوم الكبريتات.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**SOMMAIRE**

**INTRODUCTION GENERALE .....2**

**CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

**I.1 LE BETON ..... 7**

**I.2 CARACTERISTIQUES DU BETON ..... 8**

I.2.1 COMPOSITION DE LA PATE DE CIMENT HYDRATEE ..... 8

I.2.1.1 Le ciment ..... 8

I.2.1.2 Hydratation du ciment : ..... 9

I.2.1.2.1 Hydratation des silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$ ..... 10

I.2.1.2.2 Hydratation de  $C_3A$  : ..... 10

I.2.1.2.3 Hydratation du  $C_4AF$ : ..... 11

I.2.1.3 La structuration de la pâte de ciment : ..... 11

I.2.1.3.1 La portlandite : ..... 11

I.2.1.3.2 Les C-S-H : ..... 12

I.2.1.3.3 Les aluminates de calcium hydratés : ..... 12

I.2.2 POROSITE DE LA PATE DE CIMENT ..... 13

I.2.3 L'EAU EXISTANTE DANS LA PATE DE CIMENT ..... 14

I.2.4 L'AUREOLE DE TRANSITION OU L'INTERFACE PATE -GRANULATS ..... 15

**I.3 LA DURABILITE DU BETON ..... 16**

I.3.1 GENERALITES ..... 16

I.3.2 LES DIFFERENTES AGRESSIONS CHIMIQUES ..... 17

I.3.3 COMPORTEMENT DU BETON FACE AUX ATTAQUES SULFATIQUES EXTERNES..... 18

I.3.3.1 Définition de l'attaque sulfatique externe : ..... 18

I.3.3.2 L'ettringite dans le béton ..... 20

I.3.3.3 Les sources de sulfates ..... 20

I.3.3.4 Processus de dégradation du béton sous l'action d'attaques sulfatiques externes ..... 22

I.3.3.4.1 Les causes et les conséquences de dégradation du béton sous l'effet des sulfates ..... 22

I.3.3.4.2 L'action chimique des ions des sulfates dans le béton..... 23

I.3.3.5 Les paramètres influant sur l'attaque sulfatique externe ..... 26

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

I.3.3.5.1 L'influence des paramètres de l'environnement sur l'attaque sulfatique externe.....	26
I.3.3.5.2 L'influence des paramètres de formulation sur l'attaque sulfatique externe	29
<b>I.4 LE BETON RENFORCE DE FIBRES (FRC).....</b>	<b>31</b>
I.4.1 GENERALITE SUR LES FIBRES .....	31
I.4.2 PRINCIPE D'ACTION DES FIBRES : .....	32
I.4.3 LES FIBRES NATURELLES .....	33
I.4.3.1 Composition chimique des fibres végétales .....	34
I.4.3.1.1 Cellulose .....	34
I.4.3.1.2 Hémicellulose .....	34
I.4.3.1.3 Lignine .....	35
I.4.3.1.4 Les pectines .....	35
I.4.3.1.5 Les cires : .....	35
I.4.3.2 Structure d'une fibre végétale .....	36
I.4.3.3 Propriétés des fibres végétales .....	37
I.4.3.4 Disponibilité des fibres végétales .....	38
I.4.3.5 Les fibres d'alfa .....	39
I.4.3.5.1 Description général de la plante .....	39
I.4.3.5.2 Répartition géographique .....	40
I.4.3.5.3 L'utilisation d'alfa.....	41
I.4.3.6 Les fibres de chanvre .....	42
I.4.3.6.1 Description général de la plante .....	42
I.4.3.6.2 Répartition géographique .....	44
I.4.3.6.3 L'utilisation des fibres chanvre : .....	44
I.4.4 LES FIBRES SYNTHETIQUES .....	45
I.4.4.1 Introduction .....	45
I.4.4.2 Les fibres de polypropylène.....	47
I.4.5 LE BETON RENFORCE DE FIBRE (FRC) .....	47
I.4.6 LES BETONS RENFORCES DE FIBRES SYNTHETIQUES.....	48
I.4.7 LES BETONS RENFORCES DE FIBRES NATURELLES .....	49
I.4.7.1 L'état frais.....	49
I.4.7.2 L'état durci .....	50
<b>I.5 SYNTHESE DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>51</b>

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**I.6 LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....51**

**CHAPITRE II.MATERIAUX UTILISES ET METHODES  
EXPERIMENTALES**

**II.1 INTRODUCTION .....65**

**II.2 MATERIAUX UTILISES .....65**

II.2.1 LE CIMENT .....65

II.2.2 LES GRANULATS .....66

II.2.3 L’EAU DE GACHAGE .....67

II.2.4 L’ADJUVANT .....67

II.2.5 LES FIBRES .....68

II.2.5.1 Les fibres végétales .....68

Ce sont les fibres d’alfa et de chanvre. ....68

II.2.5.1.1 Les fibres d’alfa .....68

II.2.5.1.2 Les fibres de chanvre .....70

II.2.5.1.3 Les fibres Synthétiques .....71

**II.3 FORMULATION DES BETONS .....71**

II.3.1 LES BETONS ETUDIES .....74

**II.4 METHODES EXPERIMENTALES .....76**

**II.5 CARACTERISATION DES DIFFERENTS BETONS CONFECTIONNES .....77**

II.5.1 A L’ETAT FRAIS .....78

II.5.1.1 Ouvrabilité au cône d’Abrams .....78

II.5.1.2 Mesure de la masse volumique .....79

II.5.2 A L’ETAT DURCI .....79

II.5.2.1 Propriétés mécaniques : Résistances mécaniques et module de Young .....79

II.5.2.2 Propriétés physiques .....80

II.5.2.2.1 La porosité accessible à l'eau .....80

II.5.2.2.2 L'absorption capillaire .....81

II.5.2.2.3 La perte de masse .....82

**II.6 CONCLUSION .....83**

**II.7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....83**



**CHAPITRE III. ETUDE DES PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES DES  
BETONS RENFORCES DE FIBRES VEGETALES**

<b>III.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>86</b>
<b>III.2 EFFET DES CARACTERISTIQUES DES FIBRES VEGETALES SUR LES PERFORMANCES PHYSICO-MECANIQUES DU BETON .....</b>	<b>87</b>
III.2.1 A L'ETAT FRAIS.....	87
III.2.1.1 Essai d'affaissement ou Slump Test.....	87
III.2.1.2 La masse volumique.....	88
III.2.2 A L'ETAT DURCI.....	89
III.2.2.1 Les propriétés mécaniques .....	89
III.2.2.1.1 Résistance à la compression.....	89
III.2.2.1.2 Résistance à la traction par flexion.....	91
III.2.2.1.3 Le module d'élasticité dynamique.....	93
III.2.2.2 Les propriétés physiques .....	94
III.2.2.2.1 La porosité.....	94
III.2.2.2.2 Absorption capillaire .....	95
III.2.2.2.3 La perte de masse .....	97
III.2.3 OBSERVATION AU MEB DE LA MICROSTRUCTURE .....	99
<b>III.3 EFFET DU RAPPORT E/C SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BETON RENFORCE DE FIBRES VEGETALES .....</b>	<b>100</b>
III.3.1 A L'ETAT FRAIS.....	100
III.3.1.1 L'essai d'affaissement.....	100
III.3.1.2 La masse volumique.....	101
III.3.2 A L'ETAT DURCI.....	101
III.3.2.1 Les propriétés mécaniques .....	101
III.3.2.1.1 Résistance à la compression.....	101
III.3.2.1.2 Résistance à la traction par flexion .....	103
III.3.2.2 Les propriétés physiques .....	104
III.3.2.2.1 La porosité .....	104
III.3.2.2.2 Absorption capillaire .....	105
III.3.2.2.3 La perte de masse .....	106
<b>III.4 CONCLUSION .....</b>	<b>107</b>
<b>III.5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>108</b>

**CHAPITRE IV. ETUDE DE LA DURABILITE DES BETONS RENFORCES DE FIBRES FACE AUX ATTAQUES SULFATIQUES EXTERNE**

<b>IV.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>112</b>
<b>IV.2 MATERIAUX ET MATERIELS UTILISES .....</b>	<b>112</b>
<b>IV.3 METHODE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>114</b>
IV.2.1 IMMERSION COMPLETE .....	115
IV.2.2 CYCLES D'IMMERSION/SECHAGE A 60 °C .....	116
<b>IV.3 RESULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>117</b>
IV.3.1 IMMERSION TOTALE.....	117
IV.3.1.1 Perte de masse.....	117
IV.3.1.2 Résistance à la compression.....	119
IV.3.1.3 Observation macroscopique.....	120
IV.3.2 IMMERSION/SECHAGE A 60°C .....	121
IV.3.2.1 Suivi de masse.....	121
IV.3.2.2 La résistance à la compression.....	122
IV.3.2.3 Suivi macroscopique des différents échantillons.....	123
IV.3.2.4 Étude microscopique.....	125
IV.3.3 L'EFFET DE RAPPORT E/C .....	127
IV.3.3.1 La perte de masse.....	127
IV.3.3.2 Résistance à la compression.....	128
IV.3.4 ATTAQUE DES BETONS PAR LES SULFATES DE MAGNESIUM (Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).....	129
IV.3.4.1 Variation en masse.....	129
IV.3.4.2 Résistance à la compression .....	130
<b>IV.4 CONCLUSION.....</b>	<b>132</b>
<b>IV.5 LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>133</b>
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>133</b>
<b>LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>133</b>

## **Liste des figures**

Figure I.1 Les hydrates formés dans la réaction d'hydratation. ....	13
Figure I.2 Processus de dégradation du béton par les attaques chimiques .....	18
Figure I.3 Bétons dégradés par les sulfates .....	19
Figure I.4 Quelques échantillons de roches gypseuses existantes dans les sols .....	22
Figure I.5 Processus de fissuration du béton .....	32
<b>Figure I.6</b> Structure détaillés d'une fibre végétale .....	37
<b>Figure I.7</b> La plante d'alfa sous forme de touffes circulaire .....	39
<b>Figure I.8</b> Morphologie de la plante d'alfa .....	40
<b>Figure I.9</b> Répartition géographique des steppes algériennes.....	41
Figure I.10 Plante de cannabis, la tige du chanvre .....	43
Figure I.11 Produits du défibrage du chanvre .....	43
Figure I.12 La production mondiale du chanvre en 2016.....	44
Figure I.13 Les fibres synthétiques .....	46
Figure II.1 Courbes de la distribution granulométriques des granulats utilisées.....	66
Figure II.2 Les fibres d'alfa utilisées.....	69
Figure II.3 Microscopie des fibres d'alfa utilisées .....	69
Figure II.4 Les fibres de chanvre utilisées .....	70
Figure II.5 Les fibres de polypropylène utilisées.....	71
Figure II.6 Détermination de la composition granulaire du béton ordinaire .....	74
Figure II.7 Malaxage sec.....	77
Figure II.8 Malaxage humide.....	77
Figure II.9 Prismes 7x7x28cm.....	77
Figure II.10 Cylindres 11x22cm.....	77
Figure II.11 Essai d'affaissement au cône d'Abrams .....	78
Figure II.12 Machine d'écrasement des différents essais.....	80
Figure II.13 Dispositif utilisé pour la détermination de la porosité totale à l'eau.....	81
Figure II.14 Pesée hydrostatique.....	81
Figure II.15 Essai d'absorption capillaire. ....	82
Figure III.1 L'affaissement au cône d'Abrams des bétons confectionnés .....	87
Figure III.2 Les résultats de la densité des bétons confectionnés .....	88
Figure III.3 Essais à la compression simple réalisés sur un béton HC-0.25.....	89
Figure III.4 Résistance à la compression des bétons étudiés.....	90

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Figure III.5 Essais de traction par flexion réalisées sur le béton HC-0.25 .....	91
Figure III.6 Exemple de phénomène de couture des fibres d'alfa.....	91
Figure III.7 Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés.....	92
Figure III.8 Module de Young (dynamique) des bétons confectionnés à 28 jours.....	93
Figure III.9 Porosité des bétons confectionnés à 28 jours. ....	94
Figure III.10 Absorption capillaire des différents bétons confectionnés.....	96
Figure III.11 Cinétique d'absorption capillaire des différents bétons confectionnés...	96
Figure III.12 Evolution de la masse totale des bétons confectionnés. ....	98
Figure III.13 Etude microscopiques de quelques échantillons (OC, PC et AC).....	99
Figure III.14 Affaissement des bétons confectionnés en fonction du rapport E/C....	100
Figure III.15 Densité à l'état frais des bétons confectionnés en fonction d'E/C. ....	101
Figure III.16 Résistance à la traction à 28 jours en fonction du rapport E/C .....	102
Figure III.17 Résistance à la compression à 120 jours en fonction du rapport E/C. .	102
Figure III.18 Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 28 jours.....	103
Figure III.19 Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 120 jours.....	103
Figure III.20 Porosité des bétons étudiés à 28 jours de cure en fonction E/C .....	104
Figure III.21 Absorption capillaire des bétons étudiés en fonction du rapport E/C ..	105
Figure III.22 Evolution de la masse totale des bétons étudiés en fonction de E/C...	106
Figure IV.1 Echantillon de béton de dimension 7x7x28 cm .....	113
Figure IV.2 Cubes de 7x7x7 cm découpés à partir des éprouvettes 7x7x28 cm .....	113
Figure IV.3 Balance .....	114
Figure IV.4 L'étuve .....	116
Figure IV.5 Immersion des échantillons du bétons dans la solution saline.....	116
Figure IV.6 Suivi de masse des bétons confectionnés. ....	118
Figure IV.7 Essais de compression simple des échantillons 7x7x7 cm.....	119
Figure IV.8 Essais de compression simple des échantillons 7x7x7 cm.....	120
Figure IV.9 Photographies d'échantillons à l'immersion totale. ....	121
Figure IV.10 Suivi de masse pendant 60cycles d'immersion/séchage.....	121
Figure IV.11 Résistance à la compression pendant 60 cycles d'immersion/séchage.	123
Figure IV.12 Suivi macroscopique à la fin du protocole immersion/séchage(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	124
Figure IV.13 Etude microscopique de béton ordinaire pendant le protocole immersion/séchage à 60°C.....	125

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Figure IV.14 Etude microscopique du béton d'alfa pendant le protocole immersion/séchage à 60°C .....	126
Figure IV.15 Etude microscopique de béton de polypropylène dans le protocole immersion/séchage à 60°C.....	126
Figure IV.16 Evolution de la masse des bétons étudiés en fonction de rapport E/C.	127
Figure IV.17 Résistance à la compression des bétons étudiés en fonction de rapport E/C. ....	128
Figure IV.18 Variation de la masse des bétons confectionnés en fonction des cycles /Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . ....	129
Figure IV.19 Résistance à la compression des bétons étudiés dans Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	130
Figure IV.20 Suivi macroscopique à la fin de protocole immersion/séchage(Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) .....	131

## **Liste des tableaux**

Tableau I.1 La composition chimique (%) de quelques fibres végétales .....	36
Tableau I.2 Les propriétés physiques de quelques fibres végétales .....	37
Tableau I.3 Les propriétés mécaniques de quelques fibres végétales.....	38
Tableau II.1 Composition chimiques du ciment.....	65
Tableau II.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé.....	66
Tableau II.3 Caractéristiques des granulats utilisés.....	67
Tableau II.4 Caractéristiques de l'adjuvant utilisé .....	67
Tableau II.5 Les caractéristiques de la fibre d'alfa utilisé.....	68
Tableau II.6 Caractéristiques de la fibre de chanvre utilisé.....	70
Tableau II.7 Les caractéristiques de la fibre de polypropylène utilisé .....	71
Tableau II.8 Composition de 1m <sup>3</sup> de béton ordinaire .....	74
Tableau II.9 Proportion du mélange pour 1m <sup>3</sup> des bétons de référence (OC, PC).....	75
Tableau II.10 Proportion de mélange pour 1m <sup>3</sup> du béton d'Alfa (AC) .....	75
Tableau II.11 Proportion de mélange pour 1m <sup>3</sup> du béton de Chanvre (HC) .....	76
Tableau II.12 Classes d'affaissement du béton .....	79
Tableau IV.1 Nombre d'échantillons utilisés pour l'immersion complète.....	116
Tableau IV.2 Nombre d'échantillons utilisé dans l'immersion/séchage à 60°C .....	117

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

### **1. Le contexte**

Le béton est le matériau de construction le plus utilisés dans le monde depuis l'antiquité. C'est un matériau révolutionnaire qui a beaucoup évolué tant sur sa composition, que sur ses performances mécaniques, depuis sa découverte par les Romain jusqu'à nos jours.

Plusieurs types de bétons sont actuellement sur le marché de la construction, comme par exemple le béton ordinaire (BO), le béton autoplaçant et autonivelant (BAP et BAN), le béton à haute performance (BHP), le béton très haut performance (BTHP), le béton de poudre réactive (BPR) et le béton renforcé de fibres (FRC).

Les structures en béton sont régulièrement soumises à des conditions environnementales agressives dues à une variété de produits chimiques naturels et industriels comme les acides, les sulfates, les réactions alcali-agrégat et la corrosion de l'acier. Alors ces phénomènes représentent une réelle menace à prendre en compte pour la prédiction de la durée de vie des ouvrages. Parmi les différentes formes de dégradation chimique du béton, l'attaque sulfatique externe.

L'attaque sulfatique externe (ASE) est provoquée par la pénétration dans le béton des sulfates provenant du milieu extérieur, c'est le cas des structures en contact avec l'eau de mer et les eaux usées, les tunnels et les fondations profondes en contact avec les eaux souterraines sur des sols gypseux. Les ions sulfate pénètrent le béton et réagissent avec les composés de l'hydrate (la portlandite et le silicate de calcium hydraté) par des mécanismes physico-chimiques complexes et couplés conduisant à la formation de produits expansifs comme le gypse, l'ettringite secondaire et le thaumasite sous certaines conditions réunies. Ces produits provoquent des fissures, une chute de résistance et par conséquent la diminution de la durée de vie de l'ouvrage.



## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les recommandations et les normes visant à limiter ce type d'attaques sont nombreuses et dépendent de plusieurs facteurs comme la composition du ciment, le rapport E/C, l'ajout des additions minérales.... Cependant parfois, il n'y a pas de consensus entre les deux et souvent l'incompréhension du mécanisme de dégradation persiste.

Pour améliorer la durabilité des matériaux cimentaires soumis à des environnements agressifs, des fibres de différentes natures ont été incorporés dans le béton. Ces fibres ont pour but d'augmenter la résistance à la traction, la ductilité, la ténacité du béton, et donc sa durabilité.

Les fibres métalliques et les fibres synthétiques sont les plus utilisées dans le domaine de la construction, néanmoins le prix de ces fibres est assez élevé, leur fabrication dégage du CO<sub>2</sub> et utilise des ressources non renouvelables. De ce point de vue, les fibres végétales, du fait de leur caractère naturel et renouvelable, pourraient constituer une alternative aux autres types de fibre dans le domaine du génie civil.

L'utilisation des fibres végétales comme renfort pour les matériaux composites constitue depuis une décennie un vrai challenge pour les chercheurs et les industriels. Plusieurs études de recherche traitent depuis quelques années l'impact des fibres naturelles sur la durabilité des bétons

Notre travail consiste à étudier la durabilité du béton renforcé de fibres naturelles (alfa et chanvre) et essayer d'apporter un plus dans ce domaine.

### **2. Problématique et l'objectif de la thèse**

En Algérie, les sulfates représentent une menace pour la durabilité des constructions dans certaines régions menacées par la concentration élevée des sulfates comme dans le cas de construction sur des sols gypseux ou de fondation immergées dans des eaux usées contenant des sulfates en temps de fortes pluies.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les signes de détérioration des ouvrages en béton suite à des attaques sulfatiques externes sont caractérisés un gonflement du béton et d'apparition de fissuration à cause de la formation de produits expansifs.

L'objectif général de la thèse est d'étudier le comportement mécanique la durabilité du béton renforcé de fibres naturelles comparé à un béton renforcé de fibres synthétiques exposées aux attaques sulfatiques externe.

L'approche est essentiellement expérimentale et comporte deux axes principaux :

- La confection d'un béton de structure écologique et économique renforcé de fibres naturelles non traitées en substitution aux fibres de polypropylène dérivé de pétrole.
- L'étude de la durabilité de ces bétons verts vis-à-vis aux attaques sulfatiques externes comme les sulfates de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et de sulfates de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ).

### **3. Structure de la thèse**

Notre travail est scindé en quatre chapitres :

Après **une introduction**, **un premier chapitre** sous forme d'une étude bibliographique comportant un rappel sur les composants du ciment et leur hydratation, les fibres et les bétons fibrés, les différents processus d'altérations des matériaux cimentaires face aux attaques sulfatiques externes, **Un deuxième chapitre** porte sur la caractérisation des matériaux utilisés et à la présentation des différentes techniques et essais expérimentaux à l'état frais et à l'état durci utilisés pour la réalisation de ce travail.

**Dans un troisième** chapitre nous avons présenté l'analyse des résultats obtenus sur l'influence fibres végétales (alfa et chanvre) sur le comportement physico-mécanique des bétons et leurs une comparaison avec un béton ordinaire et un béton renforcé de fibres de polypropylène pris comme bétons témoins. Différents paramètres de formulation ont été étudiés comme le taux de fibres et le rapport E/C. En fin, **un quatrième et dernier chapitre** traitant l'étude de la durabilité des bétons fibrés exposés à l'attaque sulfatique externe. La thèse se termine par **une conclusion générale** qui synthétise le travail expérimental effectué afin d'en tirer les enseignements les plus intéressants et **des perspectives** pour compléter et détailler certains volets de notre travail sous forme de travaux scientifique en vue de

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

l'obtention de l'habilitation universitaire ou travaux de doctorat pour d'éventuels encadrements.

# **Chapitre I : Etude bibliographique**

## **I. Etude bibliographique**

Ce premier chapitre est consacré à une étude bibliographique dans laquelle, nous avons rappelé les principaux travaux en relation avec notre sujet de recherche. Une première partie de ce chapitre est consacrée à une description générale du béton et les facteurs qui influent positivement ou négativement sur sa résistance, avec une description détaillée des différentes réactions d'hydratation. Une seconde partie s'intéresse aux études antérieures entreprises et publiées sur les agressions chimiques affectant le béton, en se focalisant sur l'attaque sulfurique externe. Enfin, une dernière partie traite l'analyse bibliographique du béton renforcé de fibres et plus particulièrement, la valorisation des fibres naturelles d'origine végétale.

### **I.1 Le béton**

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde en raison de multiples avantages. Sa consommation annuelle mondiale s'élève à près de 25 milliards tonnes.

Il a été inventé par les Romains qui utilisaient un mélange de chaux grasse et de pouzzolane. Ce composite évolué significativement après l'apparition de la chaux hydraulique et des ciments [1,2] au 19<sup>ème</sup> siècle.

Le béton est défini comme un matériau composite constitué d'un mélange d'une pâte de ciment, de granulats, d'éventuels adjuvants et d'additions minérales pour obtenir certaines propriétés souhaitées. Il est le matériau de construction l'utilisé par excellence dans les secteurs du bâtiment plus que ceux des travaux publics. A nos jours, il n'a pas de substitut économique et performant lorsqu'il présente les qualités requises. C'est un matériau hétérogène ayant plusieurs caractéristiques, notamment une alcalinité et une résistivité électrique élevée. Il est considéré comme une structure qui agit comme une barrière physique au transport de masse et la propagation des fissures [3]. Le compromis trouvé entre résistance mécanique, économie, esthétique et facilité de mise en œuvre, offre à ce matériau place privilégiée dans la construction au niveau mondial.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

La qualité et le potentiel du béton dépend principalement des facteurs liés à sa formulation, au choix approprié des matériaux qui le composent et aux conditions de sa mise en œuvre.

Le développement de la construction a généré une forte demande de nouveaux types de bétons, chacun destiné à une utilisation spécifique, comme les bétons autoplaçant (BAP), les bétons à haut performance (BHP) qui possèdent plus de qualités telles qu'une haute résistance et plus de durabilité. C'est aussi un matériau évolutif tant en matière de performances mécaniques, économique ou encore environnementales. En l'associant avec d'autres matériaux comme l'acier ou les fibres, on peut améliorer ses performances mécaniques et sa durabilité, et en substituant certaines de ses composantes comme par exemple les fibres synthétiques par des fibres naturelles pour limiter son impact économique et écologique [4].

### **I.2 Caractéristiques du béton**

#### **I.2.1 Composition de la pâte de ciment hydratée**

##### **I.2.1.1 Le ciment**

Le ciment Portland est un liant de nature hydraulique résultant d'un mélange de clinker (~95%) obtenu par cuisson à 1450°C, jusqu'à fusion partielle appelée clinkérisation dans des fours rotatifs avec une petite quantité de sulfates de calcium (~5%) ajoutée lors du broyage comme régulateur de prise pour empêcher la formation de cristaux d'ettringite à la surface des grains de  $C_3A$ , en formant ainsi un écran temporaire qui retarde le raidissement de la pâte au moment du gâchage [5].

En chimie des ciments, les éléments se présentent généralement sous forme d'oxydes. De ce fait, une notation spécifique a été adoptée par les cimentiers pour alléger et simplifier les formules : C pour CaO, S pour SiO, A pour  $Al_2O_3$ , F pour  $Fe_2O_3$ , H pour  $H_2O$  et  $\bar{S}$  pour  $SO_3$ .

Le clinker est lui-même un composé polyphasé, il contient majoritairement les silicates de calcium, principalement le silicate tricalcique  $C_3S$ , qui représente 50 à 70% du clinker, le silicate bicalcique  $C_2S$  qui représente de 15 à 30% du clinker,

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

l'aluminate tricalcique  $C_3A$  de 5% à 15% de clinker et l'alumino-ferrite de calcium  $C_4AF$  à un dosage de 5% à 15% de clinker [6].

- Silicate tricalcique  $C_3S$  .....  $3CaO.SiO_2$  (Alite)
- Silicate bicalcique  $C_2S$  .....  $2CaO.SiO_2$  (Bélite)
- Aluminate tricalcique  $C_3A$  .....  $3CaO.Al_2O_3$  (Celite)
- Aluminoferrite tetracalcique  $C_4AF$  ...  $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$  (Ferrite)

Les différents types de ciments sont composés par des proportions variables de clinker et d'additions minérales comme le laitier de haut-fourneau, les cendres volantes, la fumée de silice, le filler calcaire....

### I.2.1.2 Hydratation du ciment :

L'hydratation du ciment désigne une série de réactions chimiques qui se produisent simultanément, conduisant à la formation d'un solide de microstructure complexe à partir des phases anhydres mises en contact avec l'eau de gâchage et accompagné par un dégagement de chaleur. Les minéraux obtenus jouent un rôle important dans la formation de la microstructure du béton durci et de ses performances mécaniques.

La réaction d'hydratation des différents composants du ciment est complexe, elle se déroule en 5 phases successives [7,8] :

- La période de gâchage pendant laquelle les ions provenant de la dissolution des grains de ciment passent en solution.
- La période dormante qui permet pratiquement la mise en œuvre des bétons sur chantier.
- La période de prise durant laquelle les grains solides initialement isolés établissent un chemin continu selon la théorie de la percolation d'Acker, 1988 [9].
- La période de durcissement correspondant à la phase de structuration progressive du matériau.
- La période de ralentissement où l'hydratation des grains est fortement ralentie par la formation d'une couche périphérique épaississante d'hydrates.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Nous résumons ci-dessous les grandes étapes décrivant le processus d'hydratation du ciment dans la littérature pour les quatre phases constituantes du clinker selon la bibliographie [10-12] sont :

### *1.2.1.2.1 Hydratation des silicates de calcium C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S*

L'hydratation des 2 types de silicates de calcium : C<sub>3</sub>S et C<sub>2</sub>S est la plus rapide, elle conduit à la formation des mêmes hydrates qui sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (CH) suivant les équations 1 et 2 :

- $C_3S + 5,3H \rightarrow C_{1,7}SH_4 + 1,3CH \dots \dots \dots$  **Equation 1**
- $C_2S + 4,3H \rightarrow C_{1,7}SH_4 + 0,3CH \dots \dots \dots$  **Equation 2**

La réaction d'hydratation des silicates tricalciques (C<sub>3</sub>S) a une cinétique plus rapide que celle des silicates bicalciques (C<sub>2</sub>S) et dégage plus de chaleur.

La portlandite formée provient de la précipitation de l'excès de calcium dans la solution lors de la formation des C-S-H.

Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de CH précipitées dépendent, surtout du rapport E/C et du temps de réaction.

### *1.2.1.2.2 Hydratation de C<sub>3</sub>A :*

Le C<sub>3</sub>A est le constituant le plus réactif du clinker avec C<sub>3</sub>S, leur L'hydratation est très rapide et exothermique. En absence des sulfates, les C<sub>3</sub>A s'hydratent pour former des hexahydrates. L'ajout de sulfates de calcium (gypse) vise alors à réguler la prise du ciment.

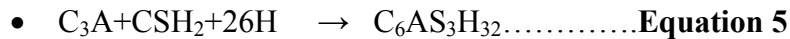
La recristallisation du gypse(Equation3) va ralentir la vitesse de réaction des C<sub>3</sub>Aqui est très élevée (Équation 4).

- $CS + 2H \rightarrow C\bar{S}H_2 \dots \dots \dots$  **Equation 3**
- $C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6 \dots \dots \dots$  **Equation 4**

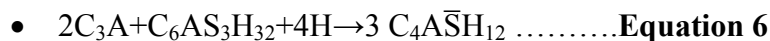


## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

En effet, le sulfate ( $C\bar{S}H_2$ ), issu de la cristallisation du **gypse**, va réagir avec les  $C_3A$  pour former du trisulfoaluminate de calcium ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ) appelé ettringite et noté AFt (Équation 5).

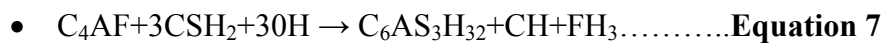


Lorsqu'il y a épuisement du gypse, l'ettringite se dissout et réagit avec les  $C_3A$  pour former des monosulfoaluminates hydratés ( $C_4A\bar{S}H_{12}$ ) notés AFm et de la Portlandite (Équation 6).



### I.2.1.2.3 Hydratation du $C_4AF$ :

Concernant l'hydratation des aluminates tétracalciques ( $C_4AF$ ), elle conduit à la précipitation des mêmes types d'évolution que celle de l'hydratation du  $C_3A$ . Les produits d'hydratation sont pratiquement les mêmes hydrates que ceux issus du  $C_3A$  où A est substitué par F dans des conditions comparables. Ses réactions sont écrites dans les équations 7 et 8 :



Les produits d'hydratation des aluminates occupent environ 15 % du volume de la pâte de ciment hydratée.

On peut alors schématiser l'hydratation du ciment comme suit :



### I.2.1.3 La structuration de la pâte de ciment :

#### I.2.1.3.1 La portlandite :

La portlandite (CH) est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé, ce constituant ne contribue pas beaucoup sur le plan mécanique mais joue un rôle essentiel vis-à-vis de la durabilité.

La portlandite couvre de 25 à 27 % du volume solide de la pâte de ciment et se présente sous forme de gros cristaux de forme hexagonale. Elle est localisée essentiellement dans les zones comportant suffisamment d'espace pour se cristalliser,

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

soit dans les bulles et les pores, soit au niveau de l'interface pâte/granulats, appelée également auréole de transition ou Inter facial Transition Zone (ITZ) [13]. Cet hydrate constitue le composant le plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 1,6g/l à 25°C, ce qui correspond à un pH de 12,6 [14].

Cependant, au cours des phases d'hydratation, une grande partie de la portlandite formée devient massive, de forme quelconque qui se trouve intimement mélangée aux autres hydrates. Quand elles se dissolvent dans l'eau, elle entraîne une diminution de la résistance mécanique du béton et de ce fait, une diminution de sa durabilité [15].

### 1.2.1.3.2 Les C-S-H :

Les silicates de calcium hydratés constituent la plus grande partie de la phase liante de la pâte de ciment hydratée, ils représentent entre 60 à 70 % du volume de pâte et leur propriété adhésive liée à leur surface spécifique importante est de l'ordre de 100 à 200 m<sup>2</sup>/g. Ce sont des composés amorphes et sont souvent appelés « gel de C-S-H » à cause de leur faible degré de cristallisation [16]. Ils sont à l'origine de la résistance mécanique de la pâte de ciment. Leurs surfaces sont très attractives et adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton comme le sable et les granulats, ce qui explique leur rôle de « colle » du ciment.

La connaissance de la microstructure exacte des C-S-H n'est pas encore complète, différents modèles existent pour décrire leur structure et leur morphologie.

### 1.2.1.3.3 Les aluminates de calcium hydratés :

C'est le monosulfoaluminate de calcium hydraté qui fait partie du groupe des AFm (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-mono) ou le trisulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite) symbolisé par AFt (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-tri) :

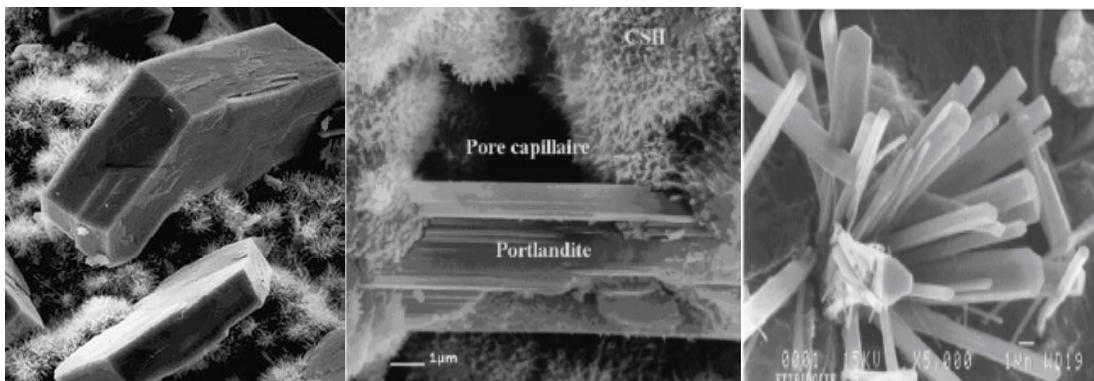
- **L'ettringite (AFt) :** Ce sont des produits non expansifs sous forme aciculaire (aiguilles) résultant de la réaction de l'aluminate tricalcique (C<sub>3</sub>A) et le gypse utilisé en faible pourcentage pour éviter la prise rapide de ciment dont la formule chimique est donnée par : 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.CaSO<sub>4</sub>.12H<sub>2</sub>O. La solubilité de l'ettringite diminue fortement quand la teneur en hydroxyde de calcium de la

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

solution interstitielle augmente. De plus, elle est proportionnelle à la température et/ou la présence d'ions en solution tels que les ions  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ .

- **Le monosulfoaluminate de calcium hydraté (AFm):** La formule chimique est  $3.\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaSO}_4.12.\text{H}_2\text{O}$ . Il présente une structure hexagonale stratifiée. Il est constitué de plusieurs couches de  $2.\text{Ca}.\text{Al}(\text{OH})_6$  entre lesquelles s'interposent des ions sulfates et des molécules d'eau. Cet hydrate n'étant pas stable thermodynamiquement, dans le cas d'un apport externe en sulfate, il se transforme lentement pour former l'ettringite secondaire. Dans le cas contraire, il réagit lentement avec l'aluminate ( $\text{C}_3\text{A}$ ) et l'Aluminoferrite ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) excédentaires pour former un hydrate complexe contenant des ions aluminate, ferrate, sulfate, calcium et hydroxyle [17-19].

Des images en microscopie électronique à balayage (MEB) de cristaux des hydrates formés sont présentées dans la figure I.1.



Portlandite (CH) [14] - Silicate de Calcium hydraté (CSH) [16] - Ettringite [18]

**Figure I.1** Les hydrates formés dans la réaction d'hydratation.

### I.2.2 Porosité de la pâte de ciment

La porosité de la pâte ciment est un paramètre indispensable car il conditionne en partie la durabilité de bétons et sa résistance à la pénétration des agents agressifs. Le réseau poral représente environ 10 % en volume du béton et comprend deux grandes familles de pores :

- les pores des hydrates, en particulier ceux des C-S-H et des pores des capillaires qui sont en réalité l'espace inter-granulaire initialement occupé par l'eau de gâchage mais non comblé par les hydrates. Ces pores ont des

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

dimensions qui couvrent plusieurs ordres de grandeur allant du nanomètre au millimètre dans la plage 0.01-50 $\mu$ m. La connectivité du réseau capillaire, ce qu'on nomme par tortuosité, est un paramètre qui influe directement sur la durabilité du matériau et sur sa capacité à résister à la pénétration des agents délétères du milieu extérieur.

- Les pores des hydrates ou les pores de gel qui sont beaucoup plus faibles que ceux de la porosité capillaire, ils sont intrinsèques au hydrates et indépendant de la formulation de la pâte, leurs dimensions caractéristiques sont de l'ordre de nanomètre, ils sont appelés également pores nanométrique [20,21].

### I.2.3 L'eau existante dans la pâte de ciment

L'eau est l'un des constituants essentiels pour la confection du béton, tout comme le ciment et les granulats. Elle remplit deux fonctions essentielles ; une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques qui vont lui permettre d'avoir un écoulement sans ségrégation dans les coffrages, et une fonction chimique qui contribue au développement des réactions d'hydratation et la formation de la pâte liante dans le béton.

La moitié de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40% se trouve dans les pores des hydrates et 10% se loge dans les vides présents dans la matrice. [22]. L'eau va jouer un rôle essentiel dans le comportement du matériau durci non seulement du point de vue mécanique mais aussi dans la durabilité. Son mouvement au cours de la vie de l'ouvrage est responsable de l'apparition de phénomènes comme le retraits de dessiccation, le gonflement, les fissurations du béton lors des cycles gel – dégel, .....

L'eau se présente sous différentes formes dans le béton, on peut distinguer [23]:

- **L'eau libre** : elle se trouve dans les pores capillaires supérieurs à 10  $\mu$ m, c'est-à-dire les gros pores et les fissures, elle n'est pas soumise au forces d'attraction des surfaces solides, elle migre et s'éliminer lors de séchage ou du gâchage à des températures comprises entre 30 et 120°C.
- **L'eau adsorbée** : c'est l'eau fixée sur la surface extérieure soumise à des forces d'attraction que ce soit physique ou chimique.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- **L'eau chimiquement combinée** : C'est l'eau qui réagit avec les grains du ciment pour former de nouveaux produits comme le C-S-H et l'ettringite comme l'eau hydroxyle, l'eau inter feuillet et l'eau inter-lamellaire.

### **I.2.4 L'auréole de transition ou l'interface pâte -granulats**

Les granulats occupent une grande partie du volume du béton, ils constituent de 60 à 75% du volume et constituent le paramètre principal influant sur la résistance mécanique de ce matériau.

L'auréole de transition est la zone entre pâte de ciment et les granulats. Etant fragile, cette zone constitue le point faible du béton lorsqu'il est soumis aux différentes sollicitations. Elle est caractérisée par la présence des grands pores [24,25]. L'épaisseur de l'auréole de transition est comprise entre 10 et 50 $\mu$ m pour le béton ordinaires, mais peut être limitée à 12 $\mu$ m pour d'autres bétons comme les bétons a haute performance avec comme addition la fumée de silice, dont la porosité est réduite grâce à réaction qui se produit entre la fumée de silice et la portlandite et la formation de silicates de calcium hydratés qui réduisent la porosité et améliorent la liaison entre la pâte et les granulats[26].

La qualité de cette zone dépend essentiellement de la nature et la forme des granulats utilisés ainsi que du rapport E/C. Les granulats réactifs comme le calcaire présentent une forte liaison avec la pâte de ciment et du fait des réactions chimiques se produisent au cours du temps, qui se traduit par l'augmentation des forces de liaison, contrairement aux granulats quartz qui sont neutre par rapport à la pâte de ciment. La forme des granulats influe aussi sur cette zone. Les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats concassés sont plus fortes qu'entre les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats roulés. A noter que lorsque E/C augmente, cette zone devient plus épaisse et plus poreuse, et donc moins résistante. Sa résistance diminue jusqu'à 75% quand on réduit le rapport E/C de 0,55 à 0,40[15,27]. La forme des granulats également est un paramètre très important pour la qualité de cette zone, les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats concassés sont plus forte qu'avec les granulats roulés.

### **I.3 La durabilité du béton**

#### **I.3.1 Généralités**

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé de nos jours, sa consommation par habitant augmente de plus en plus dans le monde entier, de part de la disponibilité et le coût abordable de ses composants. Sa production peut être relativement simple et son application couvre la construction de tous les ouvrages en génie civil. La résistance et la durabilité sont souvent considérées comme les critères les plus importants dans la conception des structures en béton.

La durabilité des ouvrages en béton constitue un enjeu majeur à relever pour toutes les constructions particulièrement celles exposées à des environnements agressifs. Ces agressions peuvent altérer le béton soit par : (1) des attaques physiques comprenant l'usure de la surface, le gel/dégel ou le feu, ou (2) des attaques chimiques tels que les acides, les sulfates, les réactions alcali-granat et la corrosion d'armatures qui conduisent à des dégradations plus ou moins sévères et dans des cas extrêmes la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. Pour avoir un béton durable, il est nécessaire de connaître ces mécanismes qui conduisent à la dégradation ainsi que la résistance de nos bétons face aux altérations et aux sollicitations mécaniques et thermiques [28-31].

La durabilité c'est une caractéristique très importante, notamment pour les grands ouvrages de génie civil comme les ponts, les silos, les réservoirs, les barrages. Elle n'est pas la garantie à vie, car elle dépend des paramètres de composition du béton comme la nature chimique du liant, la compacité du squelette et de la minéralogie des granulats. Elle occupe une grande importance ans le nouveau contexte normatif européen des bétons qui couvre [32]:

- Le dimensionnement des ouvrages en béton,
- Les constituants du béton : la norme NF EN 197-1 pour les ciments, les normes NF EN 12620 et XP P18-545 pour les granulats et la norme NF EN 934-2 pour les adjuvants,
- La durabilité des bétons : la norme NF EN 206-1 qui prend en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- Les produits en béton : norme NF EN 13369,
- L'utilisation du béton dans les ouvrages : Fascicule 65A, DTU 21,...

De ce fait, la prise en compte préventive des facteurs pouvant affecté la durabilité des ouvrages est impérative lors de la conception et l'élaboration des ouvrages.

L'objectif de cette partie est de contribuer à mieux connaître le comportement du béton face aux agressions chimiques et plus particulièrement les attaques sulfatiques externes.

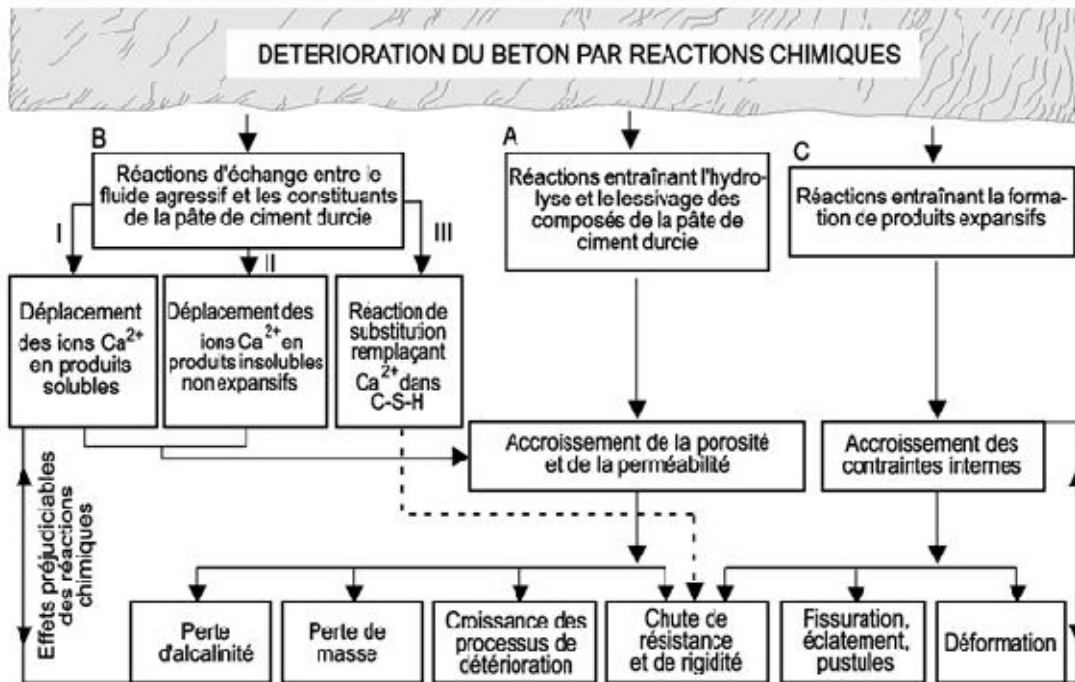
### **I.3.2 Les différentes agressions chimiques**

Différentes agressions chimiques peuvent attaquer les matériaux à matrice cimentaires, Elles constituent l'une des principales causes de l'altération la diminution de la durée de vie des bétons. Ces altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent dans la plupart des cas la dissolution de la chaux et la formation de nouveaux composés comme l'étringite secondaire dans le cas d'une attaque sulfatique externe [33]. La pénétration de ces agents agressifs dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores et des interfaces pâte-granulats, ce qui induit une modification de ses propriétés mécaniques, comme la perte de résistance et la perte de rigidité, et la création des microfissures qui peuvent être des facteurs accélérant du processus de dégradation chimique.

Les trois principaux mécanismes des transferts des agents agressifs à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption [34].

La norme EN 206 définit trois classes correspondant aux degrés d'attaques chimiques, faible (XA<sub>1</sub>), modérée (XA<sub>2</sub>) et forte (XA<sub>3</sub>). La figure I.2 représente les différents types d'agression chimiques et physico-chimiques que peuvent subir les ouvrages en bétons, et les conséquences qui en découlent :

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure I.2** Processus de dégradation du béton par les attaques chimiques [39]

Parmi les phénomènes qui nuisent à la durabilité d'un béton, on retrouve : la carbonatation/décarbonatation, la corrosion des armatures métalliques, la lixiviation, l'alcali-réaction, le cycle gel/dégel, l'attaque sulfurique, l'attaque sulfatique interne et externe. C'est la dernière pathologie qui fait l'objet de notre étude.

### **I.3.3 Comportement du béton face aux attaques sulfatiques externes**

#### **I.3.3.1 Définition de l'attaque sulfatique externe :**

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton, leur action est connue depuis longtemps, elle a été diagnostiquée par Candlot en 1887. Elle reste jusqu'à ce jour une pathologie assez répondeue et dont les mécanismes ne sont pas parfaitement maitrisés [35].

L'attaque sulfatique externe (ASE), est une réaction entre les ions sulfates provenant de milieu extérieur et les composants d'hydratation du ciment comme la portlandite et le silicate de calcium hydratés, elle aide à la formation de gypse, d'ettringite et/ou de thaumasite et peut entrainer des fissures, des écaillages, une expansion, une perte de résistance et d'autres formes de dommages jusqu'à la ruine de l'ouvrage [36]. Les ions



## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

sulfates pénètrent par diffusion dans la matrice cimentaire dont le cheminement dépend de la diffusivité du matériau et donc, de sa porosité.

C'est un phénomène classé comme agression physico-chimique de part son régime d'exposition aux sulfates. La condition d'exposition pourrait être une immersion complète dans une solution de sulfate, un mouillage et un séchage cycliques dans un milieu riche en sulfate ou une immersion partielle sous température ambiante [37,38].



**Figure I.3** Bétons dégradés par les sulfates [38]

Le mécanisme de l'attaque par les sulfates est complexe, il dépend de divers facteurs comme le type de ciment, la présence d'adjuvants minéraux, le rapport eau-ciment, la perméabilité, le type de cation associé à l'anion sulfate, la concentration de sulfate, le temps et la durée d'exposition et l'environnement.

De nombreuses analyses théoriques et simulations numériques ont été publiées sur la relation entre la distribution des ions sulfates ou des produits d'attaque aux sulfates ainsi que les effets de la contrainte d'expansion et de la déformation dans le béton [39]. Cependant, il est encore difficile de quantifier exactement le produit d'attaque sulfatique et son interaction dans le béton.

Avant d'expliquer le phénomène des attaques sulfatiques, il est nécessaire de donner un bref rappel sur la formation de l'ettringite dans le béton.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### I.3.3.2 L'ettringite dans le béton

Dans le domaine de la chimie des bétons, on peut distinguer trois types d'ettringite [40,41]

- **L'ettringite primaire** : c'est le produit de réactions entre l'aluminate tricalcique  $C_3A$  et le gypse (régulateur de prise) au cours de l'hydratation du ciment dont la composition chimique est :  $(Ca_2Al(OH)_6)_2Ca_2(SO_4)_3,32H_2O$ . Cet hydrate se cristallise sous forme d'aiguille hexagonal qui se crée avant le durcissement du béton. Elle est stable à température ambiante et n'est jamais expansive ni pathologie.
- **L'ettringite secondaire** : Connue sous le nom de SEF (Secondary Ettringite Formation), elle se cristallise dans le béton durci et peut générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation. Sa formation est rendue possible à cause de l'apport en sulfates soit d'origine interne (granulats, eau de gâchage...) ou d'origine externe (eaux à fortes teneur en sulfate, pollutions des sols...). Lors d'un apport extérieur de sulfates, l'ettringite secondaire présente un faciès dit « massif et comprimé ».
- **L'ettringite de formation différée** : connue sous le nom de DEF (Delayed ettringite formation), elle se cristallise dans un béton durci et concerne uniquement des bétons ayant subis à jeune âge une augmentation de température supérieure de l'ordre de 65 à 70°C. Lorsque l'ettringite primaire ne peut pas se former pendant les premiers instants de l'hydratation, elle se dissout dans la solution interstitielle et permet la formation de l'ettringite différée à température ambiante en présence d'une forte humidité. La formation différée de l'ettringite peut également avoir lieu dans les bétons sous la chaleur d'hydratation, sa formation engendre des contraintes internes qui peuvent mener au gonflement et à la fissuration du béton.

### I.3.3.3 Les sources de sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenant de la pollution domestique et industrielle :

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

1. Les sols peuvent contenir naturellement une quantité de sulfates entre 0.01 et 0.05%). Dans le cas des sols constitués de roches gypseuses, cette teneur peut être supérieure à 5%.
2. Les engrais acidifiant tels que le sulfate d'ammonium sont parfois utilisés en agriculture pour amender le sol. La décomposition biologique aérobie de ces substances peut entraîner formation des sulfates.
3. Les eaux souterraines séléniteuses qui proviennent de la dissolution de nappes de gypse.
4. L'eau de mer qui est naturellement chargée en sulfates.
5. Les sols des sites industriels, comme par exemple l'industrie du textile ou les stations de traitement des eaux, peuvent contenir des quantités de sulfates très supérieures à celles de la normale. Ces pollutions sont visibles notamment dans les sols et les eaux ruisselantes [16].

Il existe deux formes d'endommagement des bétons par des attaques sulfatiques externes qui peuvent endommager les bétons (Figure I.4) :

- La présence de sols gypseux en zones urbaines qui peuvent contenir jusqu'à 85% de gypse à partir de 12 m de profondeur [42-45] est à l'origine de multiples formes d'endommagement des bétons. En temps de fortes pluies, certaines parties des constructions se retrouvent immergées dans des solutions souterraines contenant des doses importantes de sulfates et causent souvent leur dégradation et leur corrosion.
- La pollution atmosphérique, comme celle qui peut être générée dans certaines zones industrielles, comme par exemple les cimenteries et les usines de fabrication des batteries pour voitures. En effet, les gaz rejetés par les cimenteries dans l'atmosphère lors de la cuisson du clinker, et la propagation dans l'air du  $\text{SO}_2$  due à la dissolution de l'acide sulfurique lors de la fabrication des batteries des voitures, causent la corrosion des matériaux ferreux et la détérioration des bétons à long terme dans toutes les zones avoisinantes [4,46].

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure I.4** Quelques échantillons de roches gypseuses existantes dans les sols [32]

I.3.3.4 Processus de dégradation du béton sous l'action d'attaques sulfatiques externes

*I.3.3.4.1 Les causes et les conséquences de dégradation du béton sous l'effet des sulfates*

Deux causes majeures déclenchent ces attaques, comme l'augmentation de la teneur en sulfates et une grande perméabilité du matériau. Ces causes sont elles-mêmes induites par de nombreux paramètres comme par exemple un excès en eau ou une mauvaise cure.

Lorsque le matériau cimentaire est au contact avec un milieu riche en ions de sulfates, l'attaque sulfatique externe se produit selon les 3 étapes suivantes :

- le transfert des ions des sulfates dans le milieu poreux contrôlé par la perméabilité et la diffusivité du matériau,
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé et des ions  $\text{SO}_4^{-2}$  provenant de l'extérieur.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

- La conséquence des deux précédentes étapes est la formation de produits expansifs résultant de l'apparition de nouvelles phases cristallines.

Les deux conséquences majeures résultant de l'attaque sulfatique externe sont d'une part la modification chimique de la matrice cimentaire par la dissolution de la portlandite et la décalcification des C-S-H, et d'autre part la dégradation du matériau avec une chute des propriétés mécaniques [47].

### *1.3.3.4.2 L'action chimique des ions des sulfates dans le béton*

Les différents sulfates présents dans l'eau de mer ou dans les sols pollués sont les sulfates de sodium, de magnésium, de calcium ou de potassium. Les mécanismes réactionnels dans les matériaux cimentaires dépendent forcément de la nature de ces sulfates. Leurs modes d'action dans les bétons sont complexes, nombreux, et n'ont pas encore tous été identifiés jusqu'à présent

De la réaction entre la matrice cimentaire et l'apport extérieurs en sulfates résulte des produits sulfatés précipités qui sont : le gypse, l'ettringite, et dans certains cas, la thaumasite. Ces produits jouent un rôle important dans les attaques sulfatiques externes, et peuvent entraîner un gonflement, une perte de résistance et une altération de la surface de l'élément en béton.

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'action du  $\text{SO}_4^{2-}$  combiné avec les cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ . Une forte similitude des mécanismes d'attaques entre ces trois cations. A cet effet, deux solutions ont été choisies pour la description du mécanisme d'attaques sulfatique sous l'effet des sulfates de sodium et des sulfates de magnésium. Dans le cas des sulfates de magnésium, le mode d'action est particulier de part sa différence avec les trois premiers en matière de produits expansifs.

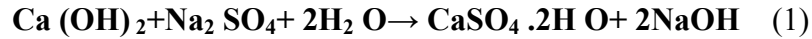
#### *A. Action du sulfate de sodium :*

Les principales réactions chimiques de sulfate de sodium avec la pâte de ciment durcie sont résumées ci-dessous [48-50] :

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

- Formation de gypse secondaire

Il se forme en présence d'une solution riche en sulfates et résulte de la substitution des ions hydroxyde par les ions sulfate au niveau de la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$ , selon la réaction (1) suivante :



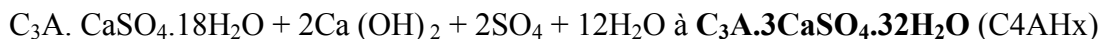
Le gypse secondaire  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est un produit expansif qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydratée, et peut entraîner peu d'expansion, voit aucune expansion. Certaines études de recherche [51] montrent qu'il peut à lui seul entraîner des dégradations à savoir l'écaillage et le gonflement du béton.

- Formation de l'ettringite secondaire expansive

Le gypse réagit avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite,  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{30-32}$ , à partir de  $\text{C}_3\text{A}$  anhydre, selon la réaction (2).



L'ettringite peut également se former à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté  $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{13}$  ou du monosulfoaluminate de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_{12}$  à partir des aluminates hydratés: (monosulfoaluminate) :



La précipitation rapide de l'ettringite conduit à la formation de cristaux très fins dont le volume molaire est 3 à 4 fois supérieur au volume du solide initial et leur formation est souvent liée à la formation de gypse, lequel peut aussi avoir des effets délétères et expansifs [52].

### B.L'action particulière d'ion de $\text{Mg}^+$

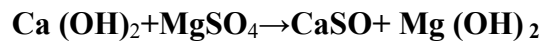
Les sulfates de magnésium ont un mode d'action particulier et réputé comme étant le plus néfaste dans le cas de l'ASE car les réactions entre les ions de sulfates et la pâte de ciment hydratée réagissent les C-S-H et la CH.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Le sulfate de magnésium réagit avec les silicates de calcium pour former du gypse et de la brucite  $Mg(OH)_2$  et avec les C-S-H pour former des M-S-H par décalcification des silicates de calcium hydratés. Les réactions mises en jeu sont les suivantes [53,54] :

- **Formation de gypse secondaire et le brucite**

$MgSO_4$  réagit avec la chaux hydratée pour donner le gypse secondaire et le  $Mg(OH)_2$  selon l'équation suivant :



L'hydroxyde de magnésium  $Mg(OH)_2$  étant peu soluble par rapport aux hydroxydes de calcium, l'attaque a lieu en continu jusqu'au bout de la dissolution. C'est pour cette raison que l'attaque par le sulfate de magnésium est la plus sévère des ASE.

De plus, il est aussi important de rappeler que la formation de la brucite, peut ralentir la pénétration des sulfates et former une couche protectrice limitant l'avancée des ions sulfate [55]

- **Formation de l'ettringite secondaire**

L'action du gypse sur les aluminates du ciment se traduit par la formation d'ettringite secondaire selon la réaction :



- **Formation de silicates de calcium hydratés (M-S-H)**

La substitution des ions  $Ca^{++}$  par les ions  $Mg^{++}$  dans les C-S-H conduit à la formation de silicate de magnésium hydraté M-S-H sans ses propriétés liantes selon la réaction :



La formation de silicates de magnésium hydratés entraîne la perte des propriétés liantes et donc la perte de la résistance mécanique de la matrice. Cette attaque est fréquemment observable sur les structures exposées aux environnements marins [56].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

- Formation de thaumasite

La thaumasite est un carbo-sulfo-silicate ou silico-aluminate de calcium hydraté, elle apparaît naturellement sous forme d'aiguilles de 0,5 à 1,5 mm de longueur avec une structure très similaire à l'ettringite, contenant du silicate à la place de l'aluminate et du carbonate à la place des ions de sulfate [57].

Les conditions requises pour la formation de thaumasite dans le béton sont le produit de la combinaison de silicate de calcium, d'ions sulfate, d'ions carbonate réunies dans un environnement très humide et froid dont la température est inférieure à 15 °C[58]. Certaines études bibliographiques confirment que la formation de la thaumasite est causée par les sulfates, d'autres études plus récentes ont conclu que la thaumasite se forme à partir d'ions de carbonate [59].

Chose certaine, est que la formation de la thaumasite entraîne la détérioration du liant et la perte de la résistance.

### I.3.3.5 Les paramètres influant sur l'attaque sulfatique externe

Dans ce paragraphe, nous exposons les paramètres majeurs qui ont un impact significatif sur le mécanisme et les conséquences de l'attaque sulfatique externe.

#### *I.3.3.5.1 L'influence des paramètres de l'environnement sur l'attaque sulfatique externe*

La nature du cation associé aux ions sulfate, la concentration en sulfates, le pH de la solution d'immersion, la température et les variations de taux d'humidité en cas de cycles d'humidification/séchages ont des facteurs décisifs pour mieux comprendre les mécanismes d'attaque sulfatique externe.

#### A. La nature du cation associé aux ions sulfates

Comme le montrent les équations précédentes, la cinétique et le mode de dégradation du béton est due à la nature du cation aux ions de sulfate ( $\text{SO}_4$ ). En effet, le sulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) ainsi que le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) ont des mécanismes d'attaques similaires à  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  malgré leurs faibles solubilités et des cinétiques de formations lentes. Cependant, le sulfate de magnésium est plus agressif que le sulfate



## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

de sodium, il réagit avec tous les produits d'hydratation du ciment, avec la portlandite pour former du gypse et de l'hydroxyde de magnésium et avec les C-S-H pour former des silicates de magnésium hydratés sans caractère liant, ce qui diminue les résistances mécaniques du béton [55], [60-63].

### B. La concentration en sulfates

L'attaque sulfatique externe est très liée à la teneur en sulfate de la solution, plus la concentration en sulfate augmente, plus la cinétique de l'attaque évolue [56].

La concentration en sulfates dépend non seulement des conditions du milieu dans lequel se trouve le béton mais aussi de la solubilité des différents précipités. Ces concentrations sont données par les normes en vigueur : EN 206 (2000), ACI 201.2R-92 (1992) et ASTM C1012 (2004).

L'étude de santhman et al. [55] a montré que pour des concentrations importantes en sulfate, la précipitation du gypse est favorisée par rapport à la précipitation de l'ettringite secondaire « AFt ». D'autre part, le renouvellement fréquent de la solution d'attaque permet une source inépuisable de sulfate en solution, il conditionne les mécanismes de l'ASE [64]. Cette théorie a été contredite par Planel [65], qui a montré que le renouvellement fréquent de la solution empêche la précipitation du gypse en surface où il a observé plutôt une zone poreuse, avec décalcification progressive des C-S-H.

### C. Le pH de la solution environnante

La valeur du pH a un rôle important dans le processus de dégradation. Irassar et al. [66], rapportent que l'ettringite n'est pas stable si le pH est inférieur à 10,7 et se décompose alors en gypse. Les travaux de Brown [67], montrent que la résistance aux attaques sulfatiques était évaluée par l'allongement des éprouvettes et la résistance en compression. Il est apparu que la résistance aux sulfates des mortiers testés est réduite par la diminution du pH. Dans la même optique, l'étude de Revertgat et al. [68] confirme l'effet accéléré de l'ASE pour des pH inférieurs à 11,50 pour des pâtes de ciment Portland comme pour des pâtes de ciment au laitier.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les travaux de Khatri et al [69] montrent que pour une solution à 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la dissolution de la portlandite ne peut se faire que si le pH passe de 7 à 12.

### D. La température :

La température a un effet sur la solubilité de tous les composés lors d'une attaque sulfatique externe. Elle influe sur le type de dégradations.

Les travaux de recherche de plusieurs auteurs ont montrés que la dégradation due à l'ASE serait rapide quand la température d'exposition est basse à cause de formation de la thaumasite [70,71].

Une forte association a été observée entre la formation de la thaumasite (TSA) et la faible température, cela apparut dans les travaux de Hossack and Thomas [70] qui ont conclu que l'attaque sulfatique externe est plus importante quand la température diminue. Skaropoulou et al [71] ont conclu également que l'attaque de sulfate à 25 °C, est beaucoup plus lente que celle à 5°C sur des tests effectués sur des mortiers.

D'autres chercheurs ont présenté des résultats contradictoires comme Santhanam et al. [72] qui ont constaté que les fortes températures entraînent une détérioration rapide des matériaux, la même observation a été faite par Adamopoulou et al. [73], attestant que l'immersion des échantillons avec les sulfates à 50°C cause des dommages importants à la surface et une forte expansion, ceci est dû à la différence des conditions de réalisations des essais comme la concentration de la solution en sulfate, la composition et la conservations des mortiers, le volume de la solution d'immersion, les dimensions géométriques des éprouvettes et enfin des durées de réalisation des essais.

### E. Les variations du taux d'humidité :

Le mode de pénétration des agents agressifs varie de façon sensible en fonction du taux d'humidité et de son évolution dans le temps. Si les ions pénètrent par diffusion dans le cas d'une immersion permanente, les cycles d'humification-séchage induisent des mouvements d'eau et des ions par absorption ce qui facilite leur pénétration [48].

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

### *1.3.3.5.2 L'influence des paramètres de formulation sur l'attaque sulfatique externe*

#### A. La composition et le type du ciment :

Les travaux de recherche de Sahmaran et al. 2007 et Khelifa 2009 [74,31] ont montré que l'utilisation des ciments à faible teneur en  $C_3A$  limite la production d'ettringite secondaire dans les systèmes de béton durci soumis à une attaque de sulfate externe. Cependant, l'utilisation de ces ciments Portland à faible teneur en  $C_3A$  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 une cible.

D'autres travaux de recherche ont été montrés que la teneur du ciment en  $C_3S$ , et en particulier le rapport  $C_3S/C_2S$ , semblent aussi avoir un effet sensible sur la résistance du liant aux sulfates.. Irassar et al. [66] ont observé des expansions nettement inférieures à un rapport de 1, avec des barres de mortiers contenant peu de  $C_3A$  et de  $C_3S$  par rapport aux expansions obtenues à partir d'un matériau contenant peu de  $C_3A$  mais beaucoup de  $C_3S$ .

#### B. Le rapport Eau / Ciment

La résistance du béton aux attaques sulfatiques externes augmente quand le rapport E/C diminue [31,36, 75,76]. Les travaux de recherche de Khelifa 2009 [31] montre plus le rapport E/C augmente plus la résistance à l'attaque sulfatique externe diminue. Quand le rapport E/C diminue, le volume et la connectivité du réseau poreux se réduisent, et rendent le matériau moins sensible aux agressions chimiques, car la pénétration des agents agressifs devient plus difficile.

#### C. Les granulats :

La nature, la forme et la qualité des granulats sont des paramètres importants qui interviennent sur la résistance du béton exposés aux sulfates. Les études de recherche ont montré que les granulats pourraient réagir avec la solution sulfatique. Les granulats calcaires contiennent des ions carbonate réactifs nécessaires à la formation de thaumasite qui altèrent les bétons avec des granulats calcaires. Un effet positif des

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

granulats calcaires peut avoir lieu sur les résistances des bétons comportant des laitiers [77]. Par contre, l'utilisation de granulats siliceux, principalement le quartz, entraîne un gonflement plus important que celui obtenu avec des granulats calcaires [78].

La zone de transition interfaciale (ITZ) joue un rôle déterminant quant-aux performances du béton face aux attaques sulfatiques externes qui provoquent la formation de produits expansifs, comme l'ettringite entre pâte et granulats ce qui provoque les fissuration de notre composite [36,79,80].

### D. Les additions minérales

Les additions minérales comme le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, la fumée de silice et la cendre volante, augmentent la résistance du béton aux sulfates sous deux formes : (1) la consommation de la chaux libérée par la réaction d'hydratation du ciment, (2) la formation concomitante de C-S-H d'une part et à l'accroissement de la compacité du matériau d'autre part.

- Laitier de haut fourneau : Les laitiers de haut fourneau sont des résidus de l'industrie sidérurgique. La réaction d'activation des laitiers va consommer la portlandite, hydrate essentiel à la formation d'ettringite secondaire expansive. L'influence des laitiers est nettement moins perceptible dans le cas de la solution de  $MgSO_4$  comparé à la solution de  $Na_2SO_4$  [76]. Dans le cas des ciments au laitier grâce aux réactions pouzzolaniques forte consommatrice de (CH), elles conduisent à la diminution de la formation de gypse, et donc de l'ettringite, ceci peut expliquer la diminution observée de l'expansion des ciments de taux de laitier important [81].
- Les cendres volantes : elles ont peu d'influence sur le comportement du béton vis-à-vis de l'attaque sulfatique, quelque soit le cation associé ( $Na^+$  ou  $Mg^{2+}$ ) mais ces résultats sont cependant spécifiques au type de cendres utilisé [82].
- Les fillers calcaires : ils limiteraient le gonflement, mais cet/effet est contradictoire puisque l'effet de cette addition semble dépendre d'autres paramètres comme la nature du cation et le type de ciment. Par ailleurs, ces constituants apportent des ions carbonate, qui peuvent entraîner la formation de thaumasite, si les conditions de température et d'humidité y sont favorables [66,83].

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- La fumée de silice : C'est une addition minérale à caractère pouzzolanique : elle réagit avec la portlandite pour former des C-S-H, ce qui lui confère un effet bénéfique sur la résistance aux sulfates. La consommation de la portlandite peut avoir des effets négatifs en rendant les bétons plus vulnérables à cause de la décalcification des C-S-H dans le cas d'une exposition aux sulfates de magnésium [84].

### **I.4 Le béton renforcé de fibres (FRC)**

#### **I.4.1 Généralité sur les fibres**

Les fibres sont largement utilisées depuis plusieurs années dans le domaine du génie civil, elles sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions.

Les fibres sont classées en trois grandes familles selon leur nature et leur propriété mécanique :

1. fibres naturelles : d'origine minérale, animale ou végétale.
2. fibres synthétiques : comme le polypropylène et le nylon.
3. fibres métalliques : comme l'acier, la fonte ou l'inox.

Les fibres présentent des caractéristiques et des propriétés différentes : forme des fibres (plate, ondulée...), état de surface (lisse, rugueuse...), dimensions (diamètre, longueur...) et l'adhérence qui garantissent des caractéristiques mécaniques spécifiques aux ouvrages dans lesquels elles sont incorporées.

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Il y a près de 3500 ans, les matériaux de construction fragiles, par exemple les briques cuites en argile étaient renforcées avec du crin de cheval, de la paille et d'autres fibres végétales [85].

Les fibres sont largement utilisées dans la matrice cimentaire depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle pour améliorer la résistance à la flexion, à la ténacité, aux chocs, à la fatigue, à l'abrasion, à la capacité de déformation et aux caractéristiques de ductilité du béton [86]. Le principal avantage des fibres est le contrôle des fissurations [87].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Les fibres d'acier et les fibres de polypropylène sont les plus utilisées comme fibres de renfort. Malgré leurs avantages, le coût élevé de la matière première, le processus de fabrication coûteux et non respectueux de l'environnement notamment les émissions à effet de serre, a incité les chercheurs et les industries à les substituer dans la mesure du possible, par des fibres végétales non traitées chimiquement pour la confection d'un béton économique, durable et respectueux de l'environnement [88,89].

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au renforcement du béton par des fibres naturelles d'origine végétales à savoir les fibres de chanvre et d'alfa, et les fibres de polypropylène comme fibres synthétique.

### I.4.2 Principe d'action des fibres :

D'après Rossi et al [90], le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles, le matériau et la structure.

Considérons une pièce de béton renforcée de fibres soumise à un effort de traction, 3 phases peuvent être distinguées sur la courbe contrainte – déformation [91] comme le montre la figure I.5 :

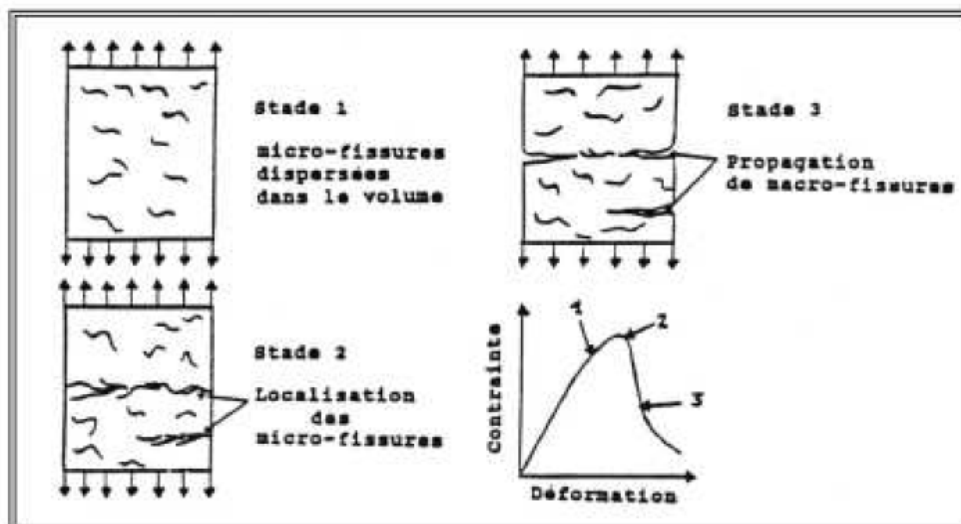


Figure I.5 Processus de fissuration du béton [90]

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Phase1:** la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface pâte-granulats. La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron, durant cette phase, les fissures sont inactives.

**Phase2:** pendant cette phase le développement des macro-fissures commence, il est dû à l'assemblage des microfissures. Les contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter leurs propagations.

**Phase3:** durant cette phase, la propagation des macro-fissures entraîne la ruine du béton.

Le mécanisme de couture des fibres assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice. Il contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures en lui conférant une bonne ductilité [92].

### **I.4.3 Les fibres naturelles :**

Les fibres naturelles sont classées en trois grands groupes selon leur origine (Figure I.7) [93]:

1- Les fibres végétales qui comprennent:

- Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok);
- Les fibres libériennes extraites des tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie);
- Les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), et d'enveloppes de fruits (noix de coco).

2- les fibres animales qui proviennent des poils (toison animale) et des sécrétions (soie);

3- les fibres minérales telles que le basalte et l'amiante.

Les fibres naturelles semblent être une alternative de moindre impact environnemental que les fibres issues de matières fossiles comme les fibres d'acier et de polypropylène, grâce à leur faible densité, leur faible coût et leurs propriétés spécifiques compétitives.

En pratique, les fibres d'origine végétale (fibres lignocellulosiques) sont les plus utilisées comme renforts dans les composites, en raison de leurs propriétés mécaniques intéressantes [94].

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres naturelles fut très tôt utilisé dans l'histoire et récemment reçu une attention croissante dans diverses industries tels que : le textile, le bâtiment, la plasturgie et l'automobile en substituant des fibres dérivés de produits pétrochimiques pour augmenter l'aspect «ecofriendly» du matériau.

Dans notre étude de recherche, les fibres naturelles désignent les fibres végétales et plus particulièrement les fibres d'alfa et de chanvre.

### **I.4.3.1 Composition chimique des fibres végétales :**

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine et d'une proportion beaucoup plus faible de pectine et des substances cireuses. Ces dernières sont constituées de différents types d'alcools et de plusieurs acides. La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée [95].

#### ***I.4.3.1.1 Cellulose :***

La cellulose est le constituant principal des fibres végétales avec une teneur variant de 15 à 99%, elle est constituée de longue chaîne dont le motif de base est le glucose reliées entre elles par une liaison glycosique de type  $\beta$ 1-4. Les nombreux groupements hydroxyles (OH) sont responsables du comportement physico-chimique de la cellulose et leur confèrent un caractère hydrophile et polaire. Les celluloses contrôlent la résistance, la rigidité et la stabilité structurelle de la fibre [96].

#### ***I.4.3.1.2 Hémicellulose :***

L'hémicellulose est constitué de polysaccharides à chaînes principales courtes et ramifiées forme la matrice de support des microfibrilles de cellulose. Elle est composée principalement de xylose, arabinose, galactose, glucose, mannose et d'acide uronique. Les hémicelluloses sont amorphes et possèdent un degré de polymérisation bien inférieur à la cellulose : entre 50 et 800 alors que le degré de polymérisation de la cellulose native est 10 à 100 fois supérieur à celle de l'hémicellulose ce qui explique leur faible résistance aux attaques chimiques [97,98].



## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les hémicelluloses sont très hydrophiles, solubles en milieu alcalin, et facilement hydrolysables dans les acides.

### *1.4.3.1.3 Lignine :*

La lignine est un polymère hydrocarboné tridimensionnel complexe à constituants aliphatiques et aromatiques. Ses principales fonctions sont d'apporter de la rigidité, une imperméabilité à l'eau et protège les plantes contre l'attaque des organismes pathogènes [99].

La lignine représente la colle qui garantit la liaison entre les fibres végétales et joue un rôle de stockage des déchets de la plante. La structure de la lignine est variable selon la nature de l'espèce végétale. Elle est totalement amorphe et hydrophobe ; non hydrolysée par des acides mais soluble dans une solution alcaline chaude. De plus, c'est un polymère thermoplastique ayant une température de transition vitreuse égale à 90°C et une température de fusion aux alentours de 170°C [100].

### *1.4.3.1.4 Les pectines :*

Les pectines sont des polysaccharides très hydrophiles à structure complexe, elles sont principalement composées d'acides galacturoniques [98]. Elles sont situées dans la lamelle moyenne et la paroi primaire des cellules et jouent le rôle de liant. Elles contribuent à maintenir la cohésion entre les tissus végétaux qui les rendent plus rigides et procurent également aux plantes leur flexibilité.

### *1.4.3.1.5 Les cires :*

Les cires biologiques sont des esters constitués de longues chaînes d'alcools et de plusieurs acides comme l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique, leur présence n'est pas constante sur les végétaux [99]. Elles sont totalement hydrophobes et imperméable à l'eau et aux gaz, limitant ainsi la transpiration des plantes.

Le tableau I.1 donne la composition chimique et les proportions en pourcentage de chaque substance des fibres végétales les plus utilisées comme la cellulose, la lignine, l'hémicelluloses, la pectine et la cire des fibres végétales les plus utilisées [101].

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Tableau I.1** La composition chimique (%) de quelques fibres végétales

<b>Fibres</b>	<b>Cellulose(%)</b>	<b>Hémicelluloses(%)</b>	<b>Lignine(%)</b>	<b>Pectine(%)</b>	<b>Cire(%)</b>
<b>Lin</b>	62–72	18.6–20.6	2–5	2.3	1.5–1.7
<b>Chanvre</b>	68–74.4	15–22.4	3.7–10	0.9	0.8
<b>Alfa</b>	45.4	38.5	14.9	–	2
<b>Sisal</b>	60–78	10.0–14.2	8.0–14	10.0	2.0
<b>Jute</b>	59–71.5	13.6–20.4	11.8–13	0.2–0.4	0.5
<b>Coton</b>	82.7–90	5.7	< 2	0–1	0.6
<b>Bambou</b>	26–65	30	5–31	–	–
<b>Bagasse</b>	32–55.2	16.8	19–25.3	–	–

I.4.3.2 Structure d'une fibre végétale :

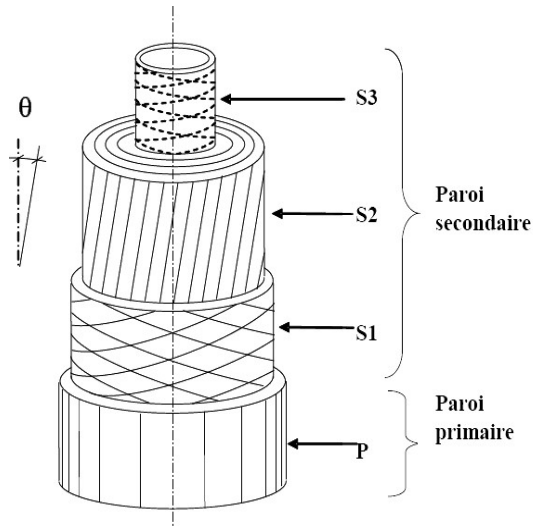
La fibre végétale est assimilable à un matériau composite dont le renfort est assuré par les fibrilles de cellulose enrobée d'une matrice formée d'hémicellulose et de lignine.

En réalité, dans la structure de la fibre végétale, la lignine constitue la matrice et l'hémicellulose joue le rôle d'agent comptabilisant entre la cellulose et la lignine. Les fibrilles de cellulose sont orientées en hélice suivant un angle nommé angle microfibrillaire qui est un paramètre très important dans la détermination du comportement mécanique de la fibre végétale [102].

La structure des fibres végétales est composée d'une paroi primaire externe généralement très mince, poreuse et très élastique dont l'épaisseur comprise entre 0,1 et 0,5µm et une paroi secondaire qui constitue la plus grande partie du volume de la fibre. La cavité centrale ouverte au centre est le lumen, elle est de nature amorphe et assure la cohésion intercellulaire.

La paroi secondaire constituée de trois couches S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> qui se différencient par leur composition biochimique (figure 1.6), par leur épaisseur ainsi que par leur arrangement interne. La couche S<sub>2</sub> est la plus épaisse, elle occupe environ de 80% de l'épaisseur de la paroi végétale et la plus importante puisqu'elle assure la rigidité mécanique globale de la fibre comme [95,96].

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure I.6** Structure détaillés d'une fibre végétale [102].

**I.4.3.3 Propriétés des fibres végétales :**

Les caractéristiques des fibres végétales peuvent intéresser les chercheurs et les industriels pour l'utiliser comme matériaux potentiels dans le secteur du textile et des composites en substitution aux fibres synthétiques.

Le pourcentage de cellulose, l'angle micro-fibrillaire, le diamètre (d) de la fibre, la longueur (L) et le rapport (L/d) constituent les principales propriétés physiques de ces fibres (Tableau I.2).

**Tableau I.2** Les propriétés physiques de quelques fibres végétales [103,104]

Type de fibre	Angle micro-fibrillaire (°)	Diamètre d (µm)	Longueur L (mm)	Rapport L/d
Lin	10	5 - 76	4 - 77	1687
Chanvre	6.2	10 - 51	5 - 55	960
Alfa	33	5 - 95	5 - 50	1964
Sisal	20	7 - 47	0.8 - 8	100
Jute	8	25 - 20	9 - 70	110
Couton	33	19	35	1842

Les propriétés mécaniques de quelques fibres végétales sont données par le tableau 1.3 [103,104].

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Tableau I.3** Les propriétés mécaniques de quelques fibres végétales.

Type de fibre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Allongement à la rupture (%)
Lin	1.4	87–1150	11.8– 96	1.3–4.9
Chanvre	1.4–1.5	270–900	23.5–90	1–3.5
Alfa	0.89	350	22	5.8
Sisal	1.33–1.5	363–700	9.0–38	2.0–7.0
Jute	1.3–1.49	320– 800	8–78	1–1.8
Coton	1.5–1.6	287–800	5.5–12.6	3–10

D'après les deux tableaux I.3 et I.4 on constate chaque type de fibre végétale présente des propriétés physiques et mécaniques différentes des autres, c'est pour cela que le comportement de chaque fibre végétale intégrée à une matrice en tant que renfort est spécifique.

#### I.4.3.4 Disponibilité des fibres végétales

Ces dernières années, l'utilisation des fibres végétales dans les applications dans le domaine des composites dans les pays industrialisés est en pleine extension en raison de leurs avantages tel que le faible cout, la disponibilité et la biodégradabilité.

Il existe également de nombreuses espèces végétales dont il est possible d'extraire des fibres sous forme de tiges telles que les fibres de chanvre, de ramie, de kenaf, ou de bambou, ou sous forme de feuille, comme le sisal, l'abaca ou l'agave, ou encore sous forme de graines comme le kapok.

L'inde, la Chine et le Brésil sont les plus grands producteurs de fibres dans le monde.

On distingue quatre grandes zones de production de fibres dans le :

- **L'Asie du sud** : le bassin asiatique est la zone de production la plus importante avec plus de 2.5 millions de tonnes de fibres végétales.
- **L'Europe** : est le second bassin de production par ordre d'importance avec 214 000 tonnes de fibres végétales (lin et chanvre) produites annuellement.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

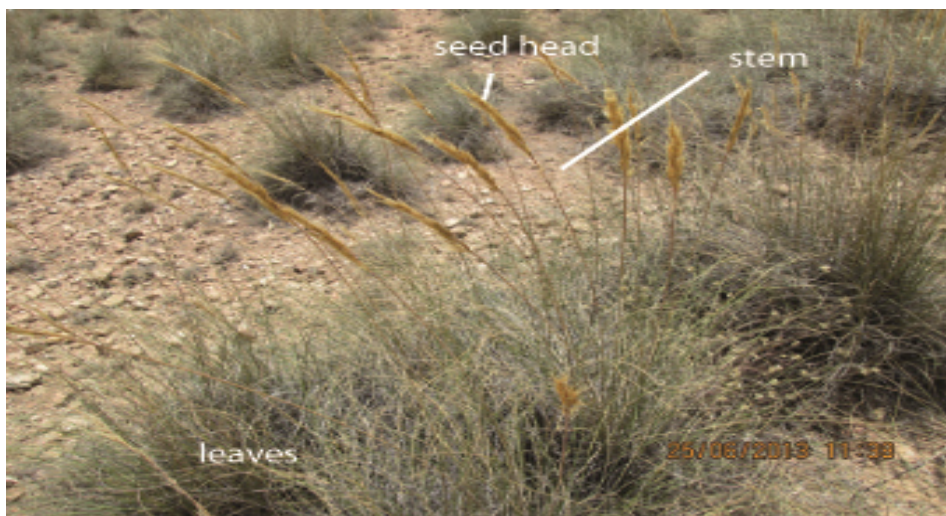
- **L'Amérique du sud:** avec une production de fibres végétales assez importante au niveau mondial. On y produit principalement du sisal avec 175 000 tonnes [105].
- **et l'Afrique de l'est :** avec une production végétale principalement du sisal de 50 000 tonnes [105]

L'Algérie est un pays très riche en plantes végétales, particulièrement dans les régions montagneuses, les hauts Plateaux et le Sahara. On y trouve l'alfa, le diss, le doum et le palmier dattier. L'Algérie avec une production annuelle de liège d'environ 6000 tonnes, 4 millions d'hectares d'alfa, possède 10 millions de palmiers-dattiers et des dizaines de milliers d'hectares très riches d'autres types de fibres tels que le Diss et le Doum. Et malgré cette richesse en fibres végétales, ces dernières restent pratiquement inexploitées. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés aux fibres d'alfa provenant d'Algérie et aux fibres de chanvres provenant du Canada.

### I.4.3.5 Les fibres d'alfa

#### I.4.3.5.1 Description général de la plante

L'alfa appelée aussi « *Stipa tenacissima* » en latin, « Halfa » en arabe, ou « Esparto » en espagnol ou encore « Alfagrass » en anglais. C'est une graminée et membre de la famille des herbes qui pousse en touffes circulaire d'environ 1 à 1,20 m de hauteur dans les zones arides et semi-arides. Elle délimite le désert et où alfa s'arrête, le désert commence [106].

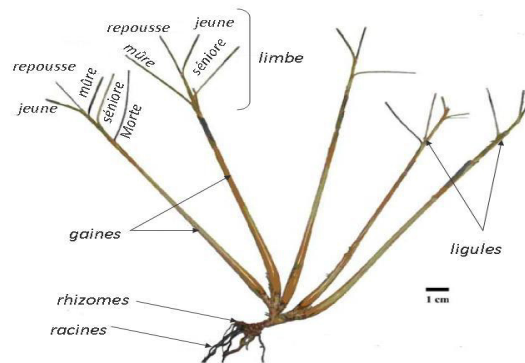


**Figure I.7** La plante d'alfa sous forme de touffes circulaire [4].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

La plante alfa comprend une partie souterraine et une autre aérienne. La partie aérienne d'alfa est constituée par un ensemble de feuilles imbriquées les unes dans les autres, longues et dressées et par les chaumes inflorescentiels de longueurs inégales portant à leur sommet les panicules en période de floraison. La partie souterraine de l'alfa peut atteindre une profondeur qui peut aller jusqu'à 1 m, ce qui la maintient bien ancrée dans le sol et lui permet de tenir et de croître. Entre les deux parties se trouve le rhizome [107] (figure I.8).

L'alfa fleurit du début mai à fin juin. Elle est récoltée manuellement de juillet à novembre et parfois sa récolte peut aller jusqu'en février.



**Figure I.8** Morphologie de la plante d'alfa [107]

L'alfa sert comme un écran contre la désertification et l'érosion éolienne grâce à ses racines qui stabilise le sable et le sol. La protection de l'alfa est essentielle afin d'assurer l'équilibre écologique dans les zones où elle croit. De plus, les feuilles proches du sol sont velues et cireuses captant les particules de sable transportées par le vent et limitent la désertification d'une autre manière.

L'alfa n'a besoin ni d'insecticides ni de pesticides nuisibles à l'environnement et consomme très peu d'eau. Elle est persistante et ne disparaît pas pendant l'hiver. Elle pousse librement formant de vastes nappes.

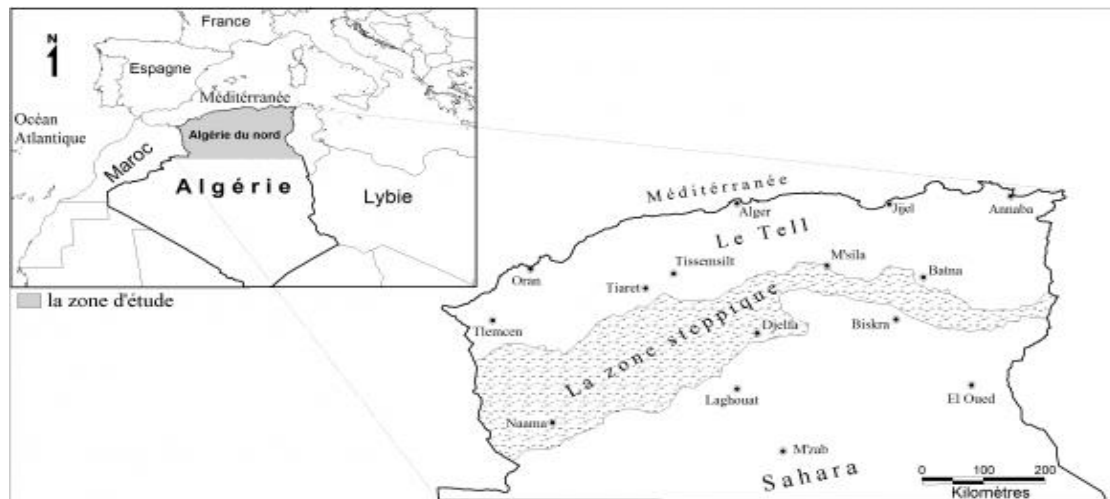
### *1.4.3.5.2 Répartition géographique*

L'alfa est une espèce méditerranéenne qui pousse généralement en steppes, qui présentent d'immenses étendues plus ou moins arides, elle couvre différentes régions de l'Afrique du Nord, depuis la Libye à l'Est jusqu'au Maroc à l'Ouest, en passant par

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

la Tunisie et l'Algérie. L'alfa existe aussi dans quelques régions du bassin méditerranéen comme le Portugal, l'Espagne et l'Italie et les Baléares. Les nappes alfatières s'étendent sur 4 000 000 ha en Algérie, 3 186 000 ha en Maroc, 600 000 ha en Tunisie, 350 000 ha en Libye et 300 000 ha en Espagne [108].

En Algérie, l'alfa est abondante dans la région oranaise, depuis le littoral jusqu'aux monts des Ksours, sur les hauts plateaux de la région de Ksar Chellala, Djelfa, autour de Boussada, jusqu'aux montagnes d'Ouled Nail et autour de Laghouat. A l'est, elle pousse surtout dans les régions ouest et sud de Sétif, les Bibans, Boutaleb et Maadi. Elle couvre également une partie importante des versants de montagnes du massif des Aurès jusqu'à Ain-Touta [109] (figure I.9).



**Figure I.9** Répartition géographique des steppes algériennes [4]

### *1.4.3.5.3 L'utilisation d'alfa*

L'alfa est une plante très noble, appelée souvent « la reine des fibres végétales » joue un rôle important dans le développement social, économique, culturel et industriel.

Les feuilles d'alfa ont longtemps été utilisées dans des objets artisanaux (Figure I.10) tels que cordages et objets en sparterie (tels que : des tapis, des paniers, des paillassons, des plateaux, des ficelles ...).

les graines d'alfa germées peuvent être consommées par l'homme, les feuilles aux acides gras insaturés, y compris l'acide oléique et l'acide linoléique qui pourrait être valorisé dans le domaine de l'alimentation et que les jeunes feuilles d'alfa peuvent

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

être pâturées par les chevaux, les chameaux, mais qu'elles sont trop riches en lignine pour les autres herbivores [103].



**Figure I.10** Utilisation de l'alfa dans l'artisanat

La tige d'alfa est constituée de fibres cellulosiques résistantes, rigides et légères qui sont principalement utilisées à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle dans la production de papiers de haute qualité utilisés pour la décoration, la cigarette et les applications diélectriques pour les condensateurs.

L'utilisation des fibres d'alfa pour la production des matériaux composites et thermoplastiques biodégradables et plus particulièrement dans à la matrice cimentaire est très récente.

### I.4.3.6 Les fibres de chanvre

#### *I.4.3.6.1 Description général de la plante*

Le chanvre est une plante annuelle originaire de l'Asie de l'ouest et de l'Asie centrale (Russie, Chine, Inde, Pakistan et Iran) qui fait partie de la famille des cannabinaées. Le nom scientifique du chanvre est *cannabis Sativa*, aussi appelée chanvre industriel. C'est une plante à croissance rapide qui peut atteindre environ 3 m de hauteur en quatre ou cinq mois [96 ,110]. La tige principale du chanvre a environ de 1 à 3 cm de diamètre, elle est très rarement ramifiée, creuse et cannelée [111] (Figure I.11).

Le système des racines du chanvre est très développé autour d'une racine pivotante qui peut atteindre jusqu'à 2,5 mètres et participe à l'amélioration de la qualité des sols grâce à son réseau racinaire important qui favorise la mise en jachère [112,113].



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Le chanvre résiste bien aux maladies et aux parasites et pousse sans avoir besoin de pesticides, de fongicides ou tout autre produit chimique.



**Figure I.10** Plante de cannabis, la tige du chanvre [113]

La plante de chanvre fournit quatre coproduits : la graine, la poudre, les fibres et les chènevottes. Ces dernières ont longtemps considérées comme un déchet utilisé essentiellement en paillage (Figure 1.12).



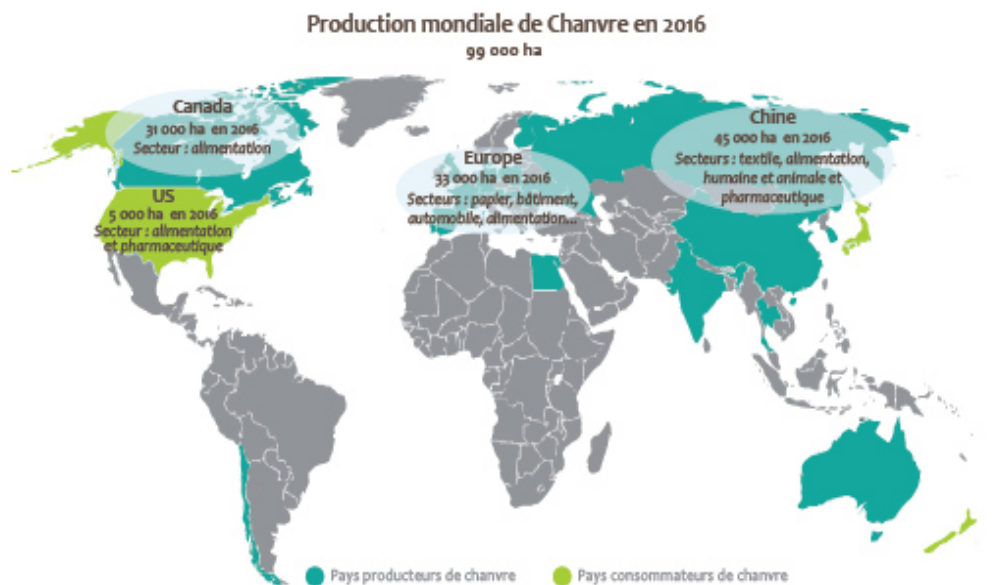
**Figure I.11** Produits du défibrage du chanvre [114]

Le processus d'extraction des fibres de chanvre se déroule en plusieurs étapes : la récolte, le rouissage sur champ et l'exploitation de la paille de chanvre [113].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### I.4.3.6.2 Répartition géographique

Le chanvre est cultivé dans les zones à climat tempéré comme la France, l'Italie, ou certains autres pays comme le Canada et la Chine. La Chine est le premier producteur mondial du chanvre avec une production qui dépasse les 50% et la France est aujourd'hui le leader européen de cette culture avec environ 9000 hectares, ce qui représente plus de la moitié des surfaces cultivées en Europe. La Répartition de la production mondiale des fibres de chanvre est illustrée dans la figure I.13.



**Figure I.12** La production mondiale du chanvre en 2016 [115]

### I.4.3.6.3 L'utilisation des fibres chanvre :

Le chanvre est cultivé par l'homme depuis le néolithique pour ces fibres résistantes, ses graines oléagineuses et ses vertus médicinales. Il y a 2000 ans en Chine, le papier était produit à base de chanvre et de murier. Au moyen-âge, la fibre de chanvre servait principalement à se vêtir, ainsi qu'à la fabrication des voiles et des cordages de navires à voiles, qui étaient initialement fabriquées de fibres de chanvre [116].

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, l'activité du chanvre a diminué du fait de la concurrence de fibres exotiques ou artificielles, le coton a progressivement remplacé le chanvre dans l'industrie du textile et a été ensuite peu à peu interdit ou fortement réglementé en raison de ses propriétés psychotropes. Cependant, depuis les années 2000, le chanvre connaît un regain d'intérêt notamment, du développement de l'agro matériaux.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

A l'heure actuelle, selon sa qualité, le chanvre est utilisé pour la production de vêtements, de tissus résistants et de papiers spéciaux. Il est utilisé en premier pour l'industrie papetière et en second lieu comme matériaux d'isolation.

Les fibres de qualité inférieure dites « papetières » utilisées sous forme d'étoupes, servent à la fabrication de pâtes à papiers spéciaux tels que : papier extra fin pour faire des livres épais, papiers médicaux, papiers cigarettes et billets de banque. Les fibres de meilleure qualité dites « techniques » sont valorisées dans le bâtiment dans la fabrication des panneaux d'isolation.

Certains estiment que le marché mondial du chanvre se compose de plus de 25 000 produits dans neuf sous-marques : agriculture, textiles, recyclage, automobile, mobilier, aliment/nutrition/boissons, papier, matériaux de construction, et soins personnels [117].

La fibres de chanvre a une résistance élevée à la traction et une forte tolérance à un environnement alcalin et est considérée comme l'une des fibres naturelles les plus solides et les plus rigides. De plus, cette fibre suscite beaucoup d'attention en raison de ses bonnes propriétés d'isolation thermique, de sa production élevée de biomasse sèche et de son potentiel de stockage de carbone élevé [118,119], Ces propriétés font de la fibre de chanvre un bon matériau de renforcement.

Dans le domaine du génie civil peu d'étude ont été faites sur le volet du renforcement contrairement au volet de l'isolation.

### **I.4.4 Les fibres synthétiques**

#### **I.4.4.1 Introduction :**

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenue à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique, elles ont fait leur apparition au début de 20<sup>ème</sup> siècle.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Les fibres synthétiques ont de plus en plus acquis une plus grande valeur en tant que fibres de renforcement pour les matériaux cimentaire et constituent une alternative à l'amiante, l'acier et aux fibres de verre, pour des raisons d'économiques et de santé [120]. Plusieurs chercheurs ont étudié l'efficacité de ces fibres en tant que matériaux de renforcement du béton comme le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), les acryliques (PAN), le polyalcoolvinylique (PVA), les polyamides (PA) et le polyester (PES). Ils ont conclu que parmi toutes ces fibres, les fibres de PP étaient les plus efficaces [121,122].

Il existe deux catégories de fibres synthétiques généralement utilisées pour le renforcement du béton : les fibres micro-synthétiques dont le diamètre est de l'ordre du micron, elles sont utilisées pour contraster la microfissuration des composés de ciment suite au retrait plastique, et les fibres macro-synthétiques dont le diamètre est de l'ordre du mm), elles ont des dimensions comparables aux fibres d'acier et peuvent également améliorer la ténacité et la résistance du béton [123].

Les fibres de polypropylène sont les fibres synthétiques les plus utilisées pour le renforcement du béton et les fibres consacrées dans de notre étude (Figure 1.14).



**Figure I.13** Les fibres synthétiques [124]

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

### **I.4.4.2 Les fibres de polypropylène**

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines, de formule chimique  $(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$ . Il est obtenu suivant le processus d'extrusion, un étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées [124]. Les fibres de polypropylène peuvent être obtenues à partir de fibres de mono-filaments coupées en faisceaux de fibres de polypropylène dites « fibres fibrillés ».

Il existe une grande variété de propriétés liée au comportement du polypropylène qui dépend de sa nature chimique, sa formulation et les conditions de mise en forme.

Les fibres de polypropylène sont largement utilisées pour renforcer le béton en raison de leurs propriétés supérieures à celles des autres fibres. Elles sont disponibles dans le commerce et offrent un point de fusion élevé ainsi qu'une meilleure stabilité chimique comparées aux fibres d'acier ou aux fibres de verre, leur coût est relativement inférieur. De plus, le polymère a une surface hydrophobe qui n'absorbe pas l'eau et n'interfère pas dans la réaction d'hydratation du béton [123] [125]. Elles ont une résistance à la traction et un module d'élasticité faibles comparées aux fibres d'acier mais sont utilisées également comme renforcement secondaire du béton pour limiter l'initiation et la propagation des fissures du au retrait, grâce à leurs bonnes propriétés de ductilité, de finesse et de dispersion.

Les fibres de polypropylène (PP) sont disponibles sous de faisceaux ou sous forme de filament individuel.

### **I.4.5 Le béton renforcé de fibre (FRC)**

Le béton renforcé de fibres (FRC) est un matériau composite constitué de ciment Portland (OPC) ordinaire, d'agrégats grossiers et fins et d'une dispersion de fibres courtes discontinues. Il s'est développé au cours des 50 dernières années comme solution alternative au béton ordinaire ou au béton armé.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Si on le compare au béton ordinaire, le FRC présente une plus grande ténacité, c'est-à-dire la capacité d'absorption d'énergie pendant le processus de rupture, ainsi qu'une résistance à la traction après fissuration supérieure à celle du béton ordinaire.

Le composite béton/fibres est une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du génie civil : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation, mobilier urbain.. Plusieurs travaux de recherches ont eu pour but la caractériser du comportement des bétons renforcés de fibres.

Le béton renforcé de fibres (FRC) est utilisé de manière significative pour divers facteurs tels que les matériaux constitutifs des fibres, la géométrie,.... La distribution des fibres est un facteur clé pour la fabrication de composites à base de ciment et leurs dispersion uniforme dans toute matrice est cruciale pour obtenir des performances optimales. Plusieurs travaux de recherche ont étudié l'effet de ces paramètres sur le comportement mécanique et physique des composites cimentaires renforcés des fibres [126-128].

### **I.4.6 Les bétons renforcés de fibres synthétiques**

Les fibres synthétiques les plus utilisés pour renforcer les matériaux cimentaires sont les fibres de polypropylène, nous nous limiterons donc seulement à l'étude de ces fibres qui sont disponibles sous deux formes : en faisceaux ou en filament individuel. Ces fibres de polypropylène contribue augmenter la cohésion apparente et réduisent légèrement l'affaissement du béton.

En raison des propriétés physiques et mécaniques des fibres de polypropylène, le béton renforcé par ces fibres peut être utilisé pour améliorer sa durabilité, ainsi que sa résistance aux chocs, à l'abrasion et à la fatigue. Ces fibres réduisent aussi le retrait plastique du béton.

Des études de recherches ont confirmé également que ces fibres pouvaient améliorer la ductilité en flexion, la résistance à la compression, la ténacité, la résistance à la

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

traction, la résistance à l'écaillage, le module de rupture et la durabilité à long terme [129].

Ces dernières années, des études menées par différents chercheurs ont montré également que les fibres de polypropylène réduisent la pression interstitielle dans la pâte de ciment, ainsi que la diminution du risque d'éclatement par explosion. À cet effet, la connectivité des pores et des microfissures formées dans le béton après la fusion du polypropylène augmente la perméabilité, empêchant ainsi l'écaillage du béton sous haute température [124, 125 et 130].

### **I.4.7 Les bétons renforcés de fibres naturelles**

Les fibres synthétiques présentent des inconvénients tels que le coût plus élevé, la libération de CO<sub>2</sub> lors de leur production et l'utilisation de ressources vierges, ce qui a incité depuis quelques années, les chercheurs et les industriels à étudier la possibilité de les substituer par des fibres naturelles et plus particulièrement des fibres d'origine végétale qui répondent aux 3 critères du développement durable: (1) économique, (2) sociale (3) environnementale en réduisant les prélèvements en ressources fossile [90] .

Les fibres végétales sont des produits non conventionnels rentables qui peuvent être utilisées comme matériaux innovants pour produire des constructions vertes et respectueuses de l'environnement dans le domaine de la construction de logements et d'infrastructures dans les zones urbaines et rurales.

Certaines fibres naturelles possèdent non seulement des propriétés mécaniques très intéressantes mais aussi de nombreux atouts environnementaux.

Les fibres végétales lors leur incorporation dans la matrice cimentaire affecte le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci.

#### **I.4.7.1 L'état frais**

L'incorporation de fibres végétales non traitées dans le béton conduit à une forte réduction de la maniabilité, due à l'absorption d'eau par les fibres. Une quantité de

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

plastifiant réducteur d'eau est ajoutée pour augmenter la maniabilité de composite sans baisser ses performances mécaniques.

L'autre aspect important qui affecte la maniabilité est la formation de pelotes de fibres, c'est à dire l'agglomération des fibres entre elles durant le malaxage. L'agglomération des fibres en pelotes pourrait être évitée en fonction du dosage de fibre et de leur longueur, pour préserver les performances mécaniques du béton fibré.

La compatibilité du ciment avec les fibres végétales reste délicate étant donné le caractère hétérogène des végétaux. Sedan [96] a étudié l'effet des fibres de chanvre sur l'hydratation du ciment, il a observé la fixation des ions calcium  $Ca^{2+}$  sur les chaînes de pectines présentes dans les fibres, ce qui a entraîné une forte diminution de ces ions dans la pâte de ciment empêchant la formation des produits d'hydratation (C-S-H).

D'autres auteurs se sont intéressés aux mécanismes d'interaction entre le bois et le ciment, ils ont conclu que le bois agit comme un inhibiteur d'hydratation du ciment par la solubilisation partielle des hémicelluloses au cours de l'interaction entre la pâte de ciment et le bois, ce qui modifie la condensation des silicates et entraîne la formation des C-S-H [131].

### **I.4.7.2 L'état durci :**

Les propriétés des bétons durcis renforcés par des fibres végétales sont fonction de plusieurs facteurs comme le type, la morphologie et l'état de surface de fibre, les propriétés de la matrice cimentaire, les proportions des différents constituants du béton, la méthode de malaxage, la méthode de mise en œuvre et les conditions de cure du béton. Ces propriétés ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche [132,133]. Kriker et al. 2005 [134] et Chafei 2015 [135] ont mis en évidence la diminution de la résistance en compression avec l'augmentation du dosage et de la longueur des fibres. Ils ont attribué cette diminution à l'augmentation des vides dans le béton, à la formation de pelotes de fibres et la non uniformité de leur répartition.



## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

En conclusion, l'utilisation des fibres végétales avec des taux et des longueurs optimaux entraîne généralement, une baisse sensible de la résistance à la compression du béton. Par ailleurs, elle améliore sa résistance à traction et à la flexion et une fois les premières fissures apparues, les fibres permettent de limiter leur propagation.

### **I.5 Synthèse de l'étude bibliographique**

Notre étude bibliographique résume tout d'abord les connaissances actuelles sur l'hydratation des ciments. Elle établit une synthèse sur les connaissances des différents processus de dégradations des bétons et plus particulièrement face aux attaques sulfatiques externe et la compréhension de cette pathologie.

Cette étude nous a permis d'avoir une idée précise sur les objectifs de notre étude recherche à savoir :

- l'impact de dosage des fibres de chanvre et d'alfa sur les propriétés mécaniques et physique des bétons de structure, ainsi que la possibilité de substituer des fibres synthétiques non écologiques par ces fibres naturelles non traitées.
- l'impact du rapport E/C sur les performances mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales
- l'étude la durabilité des bétons renforcés par des fibres végétales face à l'attaque sulfatique externe selon les protocoles en vigueur.

### **I.6 Les références bibliographiques**

[1] Afrouhsabet V., Biolzi L., Monteiro P., *The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete*, Composites Part B, Vol 139 , pp.84–96, 2018.

[2] Mehta K., Paulo J., Monteiro M., *Concrete "Microstructure, Properties, and Materials"*, Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, Third Edition, 2006.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [3] Hacene B., *contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen*, Thèse de Doctorat, université Aboubekr Belkaid – Tlemcen, 2009.
- [4] Khelifa M.R., *Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables*, Thèse en cotutelle internationale, Université Paris Seine – Université de Cergy-Pontoise /Université Ferhat Abbas Sétif 1,2017.
- [5] Scrivener K.L., Nonat A., *Hydration of cementitious materials, present and future*, Cement and Concrete Research, Vol 41, pp.651-665, 2011.
- [6] Jean Chills A, *Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration : Expérimentation et Modélisation*, Thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008
- [7] Vernet C., Cadoret G., *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours*. In: Y. Malier (Éd.), *Les B.H.P., caractéristiques, durabilité, applications*, Presse de l'ENPC, Paris, pp.115–128.
- [8] Baroghel B.V., *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 487 p, 1994.
- [9] Acker P., *Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physicochimique*, Rapport de recherche LPC n°152, p.121, 1988.
- [10] Taylor H.F.W., *Cement chemistry*, Academic press, 1997.
- [11] Khokhar M.I., *Optimisation of concrete mix design with high content of mineral additions: Effect on microstructure, hydration and shrinkage*, Ecole Centrale de Nantes, 2010.
- [12] Bordy A., *Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée*, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pantoise, 2016.
- [13] Olivier J.P., Maso J.C., Bourdette B., *Interfacial transition zone in concrete*. Advanced Cement Based Materials, Vol 2, pp. 30–38, 1995.
- [14] Ollivier J.P. et Vichot A., *La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [15] Hager I., *Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécanique*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [16] Nonat A., *L'hydratation des ciments*, In: J.P. Ollivier, A. Vichot (Éd.), *la durabilité des bétons*, Presse de l'ENPC, pp.25–50, 2008.
- [17] Pourchet S., Regnaud L., Perez J. P., Nonat A., *Early C<sub>3</sub>A hydration in the presence of different kinds of calcium sulfate*, Cement and Concrete Research Vol 39, pp 989- 996.
- [18] Ragoug R., *Attaque sulfatique externe des matériaux cimentaires : Impact de différents facteurs âge, composition du liant, présence de chlorures*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est en Structures et Matériaux, 2016.
- [19] Auger J., *mise au point et développement d'un procédé d'aide à la déconstruction des ouvrages en béton armé*, Thèse de doctorat en génie civil, Université de Toulouse, 2009.
- [20] Desa C., *Etude hydro-mécanique et thermomécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation*, Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.
- [21] Yuan Y., Li G., Cai Y., *Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair*. Cement and Concrete Research, Vol 33, pp.347-352, 2003.
- [22] Baron et Sauterey, *Le béton hydraulique*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982.
- [23] Regourd M., *L'eau dans Le béton hydraulique*, Paris, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp.59–68, 1982.
- [24] Diam S., *The microstructure of cement paste in concrete*, Proceeding of the 8th international on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 1, pp122-147, 1986.
- [25] Makeni A., *influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons*, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [26] Vivekanandam K et Patnaikuni I., *Transition zone in high performance concrete during hydration*, Cement and Concrete Research, Vol 27, pp. 817-823, 1997.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [27] XING Z., *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de Doctorat, Université de Gergy-pontoise, 2011.
- [28] Ziane S., Khelifa M.R., Mezhoud S., Medaoud S., *Durability of concrete reinforced with alfa fibers exposed to external sulphate attack and thermal stresses*, Asian Journal of Civil Engineering , Vol 23, pp.546-566, 2020.
- [29] Molez L., Bian H., Prince-Agbodjan W., *Résistance au gel/ dégel des BFUHP: Compétition entre endommagement et cicatrisation*, Chambéry, Savoie: XXXe Rencontres de l'AUGC-IBPSA, 2012.
- [30] Nguyen L.H., *Béton de structure à propriétés d'isolation thermiques améliorées: Approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2013.
- [31] Khelifa M.R et Guessasma S., *New computational model based on finite element method to quantify damage evolution due to external sulfate attack on self-compacting concrete*, Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol 28, pp.260–272, 2013.
- [32] 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.
- [33] Secco M., Lampronti G., Schlegel M., Maritan L., Zorzi F., *Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate–phosphate attack*, Cement and Concrete Research Vol 68, pp.49–63, 2015.
- [34] Benabed B., *Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons Autoplaçants*, Thèse de doctorat en codirection entre l'université de Laghouat et l'université de Cergy-Pontoise, 2014.
- [35] Blanc G., *Développement de nouveaux composites cimentaires à bas module d'élasticité : propriétés mécaniques et durabilité vis-à-vis des sollicitations environnementales*, Thèse Université Toulouse III Paul Sabatier en Génie Civil, 2017.
- [36] El-Hachem R., Rozière E., Grondin F., Loukili A., *New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials*, Cement & Concrete Composites Vol 34 , pp.357–364, 2012.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [37] Massaad G., Rozière E., Loukili A., Izoret L., *Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks*, Construction and Building Materials, Vol 127 , pp.918–931, 2016.
- [38] El- Hachem R., *Etude multi-critères de la dégradation des matériaux cimentaires par l'attaque sulfatique externe*, Thèse de doctorat en génie civil, Ecole Centrale de Nantes, 2010.
- [39] Feng P ., Edward J., Garboczi A., Changwen M., Jeffrey W., Bullard F., *Microstructural origins of cement paste degradation by external sulfate attack* , Construction and Building Materials, Vol 96 , pp.391–403, 2015.
- [40] Barbarulo B., *Comportement des matériaux cimentaires : Action des sulfates et de la température*, Thèse de doctorat en génie civil, ENS Cachan (FR)-Université Laval (CA),2002.
- [41] Salgues M, *Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : Application aux barrages en béton*, thèse de doctorat Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) 2013.
- [42] Rapport «Hangar de Stockage Sidi Khelifa – *Coopérative de céréales et légumes secs - Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Este LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
- [43] Rapport «*Pont sur Oued Djeddi – Wilaya de Biskra*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Este LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
- [44] Rapport «*Station de traitement des eaux de Ain-Tinn – Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Este LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
- [45] Rapport préliminaire «*Glissement CW134 - Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Este LTPEst, Constantine (Algérie), 2006.
- [46] Rapport «*Constataion de la dégradation du béton de l'usine de fabrication des batteries de voitures Bouzghaya - Batna*», Service Environnement de la wilaya de Batna, 2008.
- [47] Skalny J.P., *Internal sulfate attack - points of agreement and disagreement* » In: *Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, RILEM proceedings PRO Vol35, pp. 534-566, 2002.
- [48] Roziere E, *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle*, Thèse de doctorat en génie civil, Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- [48] Marchand J., Older I., Skalny J.P., *Sulfate Attack on Concrete*, CRC Press, 2003.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [49] Cefis N., Comi C., *Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete*, Cement and Concrete Research , Vol 93 , pp.57–70 ,2017.
- [50] Turker F., Aköz F., Koral S., Yüzer N., *Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume*, Cement and Concrete Research, Vol 27, pp.204-214, 1997.
- [51] Santhanam M., DCohen M., Olek J., *Sulfate attack research – whither now?*, Cement and Concrete Research, Vol 31, pp.845-851, 2000.
- [52] Mehta P.K ., *Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review*, Materials Science of Concrete III, The American Ceramic Society, pp.105-130, 1993.
- [53] Golop R.S et Taylor H.F.W., *Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions*, Cement and Concrete Research, vol.25 , p.1581-1590, 1995.
- [54] Alexandre M., Berton A., De Belin N., *Performance of Cement-Based Material in Aggressive Aqueous Environments*, Stat-of-the-Art Report, Rilem, Springer, p.471 ,2013.
- [55] Santhanam M., Cohen M.D., Olek. J., *Mechanism of sulfate attack: a fresh look, Part 2. Proposed mechanisms*, Cement and Concrete Research, Vol 33, p.341–346, 2003.
- [56] Rozière E., Loukili A. El-Hachem R., Grondin F., *Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks*, Cement and Concrete Research, Vol 39, pp.1188–1198, 2009.
- [57] RouxL.E, OrsettiS., *Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés*, Bulletin des Laboratoires Des Ponts ET Chaussées, Vol 225, pp.41-50,2000.
- [58] Report of the thaumasite Expert Group, *The thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction*, Department of Environment, Transport and the Regions (now, the Construction Industry Directorate of the Department of Trade and Industry), London, 1999.
- [59] Touloum N., BraraA., *Evidence of thaumasite formation in a newly built concrete structure in northeastern algeria*, Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction INVACO en Algérie, pp. 343-348 , 2014.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [60] Irassar E.F., *Sulfate attack on cementitious materials containing limestone fillers - A review*, Cement and Concrete Research, Vol 39 , pp.241–254, 2009.
- [61] Xiaojian G., Baoguo M., Yingzi Y., Anshuang S., *Sulfate Attack of Cement-Based Material with Limestone Filler Exposed to Different Environments*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 17, pp.543–549, 2008.
- [62] Al-Amoudi OSB., Maslehuddin M., Saadi M., *Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements*, ACI Mater J , Vol 92, pp.15–24 , 1995.
- [63] Prasad J., Jain DK., Ahuja AK., *Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar*, Asian J Civ Eng (Build Housing) , Vol 7, pp.259–68 , 2006.
- [64] Higgins D.D., Crammond N.J., *Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack*, Cement and concrete Composites, Vol 25, pp. 921-929 , 2003.
- [65] Messad S., *Mise au point d'un essai de Vieillissement accélérée de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206-1*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [66] Irassar E.F., Bonavetti V.L., González M., *Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature*, Cement and Concrete Research, Vol 33 , pp.31-41, 2003.
- [67] Brown, *An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment*, Cement and Concrete Research , Vol 11 , pp.719-727 , 1981.
- [68] Revertegat E., Richet C., Gégout P., *Effect of pH on the durability of cement pastes* , Cement and Concrete Research, Vol 22, pp.259-272, 1992.
- [69] Khatri R.P., Sirivivatnanon V., Yang J.L., *Role of permeability in sulfate attack*, Cement and Concrete Research Vol 27 (8), pp.1179-1189 , 1997.
- [70] Hossack A.M., Thomas M.D.A., *Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland limestone cement mortars*, Cement and Concrete Composites, Vol 56 , pp.115-120 , 2015.
- [71] Skaropoulou A., Kakali G., Tsvivilis S., *Thaumasite form of sulfate attack in limestone cement concrete : The effect of cement composition, sand type and exposure temperature*, Construction and Building Materials, Vol 36, pp.527-533, 2012.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [72] Santhanam M., Cohen M.D., Olek J., *Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars*, Cement and Concrete Research, Vol 32, pp. 585-592, 2002.
- [73] Adamopoulou E.P., Pipilikaki M.S., Katsiotis M., Chaniotakis., Katsioti M., *How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars*, Construction and Building Materials, Vol 25, pp.3583-3590, 2011.
- [74] Santhanam M.D., Cohen J., Olek J., *Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars*, Cement and Concrete Research, Vol 32, pp.585-592, 2002.
- [75] Monteiro P.J.M., Kurtis K.E., *Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack*, Cement and concrete Research, Vol 33, pp. 987–993, 2003.
- [76] Nehdi M., Hayek M., *Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity*, Cement and Concrete Research, Vol 35, pp. 731-742, 2005.
- [77] Ping X., Beaudoin J.J., Brousseau R., *Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface*, Cement and Concrete Research, Vol 21, pp.999-1005, 1991.
- [78] Yang S., Zhongzi X., Mingshu T., *The process of sulfate attack on cement mortars*, Advanced Cement Based Materials, Vol 4, pp.1-5, 1996.
- [79] Bederina M., Makhouloufi Z., Bounoua A., Bouziani T., Quéneudec M., *Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions*, Construction and Building Materials, Vol 47, pp.146-158, 2013.
- [80] Massaad G., Rozière E., Loukili A., Izoret L., *Do the geometry and aggregates size influence external sulfate attack mechanism?*, Construction and Building Materials Vol 157, pp.778-789, 2017.
- [81] Leemann A et Loser R., *Accelerated sulfate resistance test for concrete – chemical and 153 microstructural aspects*, Second international conference on microstructural – related durability of cementitious composites, Amsterdam, 2012.
- [82] AL-Amoudi O.S.B., Maslehuddin M., Abdulal Y.A.B., *Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments*, Construction And Building Materials, Vol 9, pp. 25-33, 1995.



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [83] Bassuoni M.T., Nehdi M.L., *Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading*, Cement and Concrete Research, Vol 39, pp. 206 – 226, 2009.
- [84] Lawrence C.D., *Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature*, Cement and Concrete Research, Vol 25(4), pp. 903-14, 1995.
- [85] Mangat P.S et El-Khatib J.M., *Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete*, Cement and Concrete Research, Vol 22 , pp.1089-1100, 1992.
- [85] Brandt A.M., *Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering*, Composite Structures, Vol 86, pp.3-9, 2008.
- [86] Simões T., Costa H., Dias-da-Costa D., Júlio E., *Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes*, Construction and Building Materials Vol 137, pp.548–556, 2017.
- [87] Soylev T.A., Ozturan T., *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*, Construction and Building Materials, Vol 73 , pp.67–75, 2014.
- [88] Wei J., Meyer Ch., *Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites*, Cement and Concrete Research, Vol 73 , pp.73 1–16 , 2015.
- [89] Merta I., Tschegg E.K., *Fracture energy of natural fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials Vol 40, pp. 991–997, 2013.
- [90] Rossi P., ACKER P., MALIER Y., *Effect of steel fibers at two different stages: the material and the structure*, Materials and structures, Vol20, pp.436-439, 1987.
- [91] Fritih Y., *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*, Thèse de doctorat, Université INSA de Toulouse, 2009.
- [92] Dhonde H.B., Mo Y.L., Hsu T.T.C., *Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams*, Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project 0-4819, Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas December 2005.
- [93] Baley C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. In: Techniques de l'ingénieur Ref: AM5 130, 2005.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [94] Magniont C., *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agro ressources*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [95] Bledzki A.K., Gassan J., *Composites reinforced with cellulose based fibers*. Progress in Polymer Science, Vol 24, pp.221-274, 1999.
- [96] Sedan D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [97] Jacob J.M., Thomas S., *Biores and biocomposites*, Carbohydrate Polymers, Vol 71, pp.343-364, 2008.
- [98] Puls J and Saake B., *Industrially Isolated Hemicelluloses*, Hemicelluloses: Science and Technology, Eds. ACS Symposium Series 864; American Chemical Society: Washington, DC, pp. 24–37, 2004.
- [99] Thiebaud S., *Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux*, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 1995.
- [100] Ragoubi M., *Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, 2010.
- [101] Dittenber D.B., Ganga H.V.S., *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 43, pp. 1419 – 1429, 2012.
- [102] Baley C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Techniques de l'Ingénieur, 2013.
- [103] Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat dans le génie des procédés, Université de haute Alsace, 2012.
- [104] Achour A., *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales*, thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2017.
- [105] Sellami A., *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (Diss): Caractérisation, durabilité et application au cas de la maçonnerie*. Thèse de Doctorat, université d'Annaba, Algérie 2015.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [106] Paiva M.C., Ammar I., Campos A.R., Cheikh R.B., Cunha A.M., *Alfa fibers: Mechanical, morphological and interfacial characterization*, Composites Science and Technology , Vol 67 , pp.1132–1138, 2007.
- [107] Rogge E., *Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d’Alfa (Esparto grass) en vue d’applications textiles*, Mémoire de maîtrise pour l’obtention du grade académique de master, Génie des matériaux, Ecole Nationale Supérieure d’Ingénieurs Sud-Alsace (UHA, Mulhouse, France), 2010.
- [108] El-Achaby M., Kassab Z., Barakat A., Aboulkas A., *Alfa fibers as viable sustainable source for cellulose nanocrystals extraction: Application for improving the tensile properties of biopolymer nanocomposite films*, Industrial Crops & Products, Vol 112 , pp. 499–510, 2018.
- [109] Djoudi S., *Contribution de bioécologie des arthropodes dans des formations à stipa tenacissima L de la région de Djelfa*, Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2013.
- [110] Ranalli P., *Advances in hemp research.* , Food Products Press, 1999.
- [111] Bouloc P., *Le chanvre industriel: production et utilisations*, France Agricole Editions, 2006.
- [112] Niyigena C., *Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne*, Thèse de doctorat , Université Blaise Pascal-Clermont II, 2014.
- [113] Tranle D., *études des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur Application au bâtiment*, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
- [114] Bassil S., *Etude de la répartition structurale des acides férulique et p-coumarique dans la chènevotte et la poudre organique de chanvre (Cannabis sativa) Exploration des voies de fractionnement pour l’obtention d’extraits à valeur ajoutée*, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2015.
- [115] Shahzad S., *Hemp fiber and its composites – a review*, Journal of Composite Materials, Vol 46(8) , pp. 973-986 , 2012
- [116] Troedec M., Rachini A., Peyratout C., Rossignol S, Max E., Kaftan O., *Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibres*. J. Colloid, Interface Science, Vol356, pp. 303–10, 2011.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [117] Azwa ZN., Yousif BF., Manalo AC., Karunasena W., A 2011; *review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres*. *Materials Des*, Vol 47, pp.424–42, 2013.
- [118] Sair S., Oushabi A., Kammouni A., Tanane O., Abboud Y., Hassani O.F., Laachachi A., El Bouari A., *Effect of surface modification on morphological, mechanical and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp – Polyurethane composite*, *Case Studies in Thermal Engineering*, 2017.
- [119] Walker R., Pavia S., Mitchell R., *Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes*, *Construction and Building Materials*, Vol 61, pp.340–348, 2014.
- [120] Angel M., Buendía L., Sánchez M.D.R., Climent V., Guillem C., *Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete*, *Cement and Concrete Research*, Vol 54, pp. 29–35, 2013.
- [121] Sarvaranta L., Elomaa E., Jarvela A., *study of spalling behaviour of PAN fiber-reinforced concrete by thermal analyses*, *Fire Materials*, Vol 17 (5), pp.225–230, 1993.
- [122] Sarvaranta L, Mikkola E., *Fiber mortar composites under fire conditions: effects of ageing and moisture content of specimens*, *Materials and Structure*, Vol 27, pp.532–538, 1994.
- [123] Di Maida P., Sciancalepore C., Radi E., Bondioli F., *Effects of nano-silica treatment on the flexural post cracking behaviour of polypropylene macro-synthetic fiber reinforced concrete*, *Mechanics Research Communications*, Vol 88, pp.12–18, 2018.
- [124] Hameed R., *Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques*, PhD thesis, University Toulouse III Paul Sabatier, 2010.
- [125] Akand L., Yang M, Wang X, *Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete*, *Construction and Building Materials*, Vol 163, pp.32–39, 2018.
- [126] Enfedaque L., Marcos G., Jaime A, Gálvez C., *Influence of Fiber Distribution and Orientation in the Fracture Behavior of Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete*, *Materials* Vol 12(2), p220, 2019.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [127] Sebaibi N., Benzerzour M., Abriak N., Influence of the distribution and orientation of fibers in a reinforced concrete with waste fibers and powders , Construction and Building Materials, Vol 65 , pp.254–263, 2014.
- [128] Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C., Agrawal V., *Fiber distribution and orientation of macro-synthetic polyolefin fiber reinforced concrete elements* , Construction and Building Materials , Vol 122, pp.505–517, 2016.
- [129] Carstens P.A.B., Marais S.A., Thompson C.J., *Improved and novel surface fluorinated products*, J. Fluor. Chem., Vol 104, pp.97–107, 2000.
- [130] Houry G.A., *Polypropylene fibers in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria*. Mag Concr Res 2008; 60(3):189–204.
- [131] Govin A., *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, France, 2004.
- [132] Aziz M. A., Paramasivam P., Lee L., *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol 3, pp123-132, 1981.
- [133] Mansur M.A et Aziz M. A., *A study of jute fibre reinforced cement composites*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol 4, pp. 75-82, 1982.
- [134] Kriker A., Debicki A., Bali M., Khenfer M., Chabannet M., *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*, Cement and Concrete Composites, Vol 27, pp.554-564, 2005.
- [135] Chafei S., *Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin*, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Caen, France, 2014.

## **Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales**

## **II. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales**

### **II.1 Introduction**

Ce chapitre présente la description des matériaux et les protocoles expérimentaux utilisés pour la réalisation du programme expérimental de nos travaux de recherche. Nous procéderons dans cette partie, successivement à la présentation des matériaux composants nos différents bétons ainsi que des essais de caractérisation des composites élaborés.

Dans un premier temps, nous présenterons les différents constituants du béton à savoir les ciments, les granulats, l'eau de gâchage et l'adjuvant avec leurs différentes caractéristiques, afin déterminer les constituants de 1 m<sup>3</sup> du béton en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse. Les fibres d'alfa, de chanvre et de polypropylène y seront caractérisées également pour être incorporées avec différents dosages et différentes longueurs dans les différents bétons.

Dans une seconde étape, nous présenterons les méthodes expérimentales qui permettent de caractériser les bétons confectionnés à l'état frais et à l'état durci que ce soit mécaniques ou physiques en précisant la technique de malaxage ainsi que la mise en œuvre et le mode de conservation des éprouvettes confectionnées.

### **II.2 Matériaux utilisés**

#### **II.2.1 Le ciment**

Le ciment utilisé dans notre étude est un CPJ.CEM II/A qui provient de l'usine de Hamma de la région de Constantine. Il est conforme à la norme algérienne NA 442-05 [1]. Ses caractéristiques chimiques sont données dans le tableau II. 1. L'application des formules de Bogue a permis d'obtenir les principales phases, à savoir ;61% de C<sub>3</sub>S, 15% de C<sub>2</sub>S, 8% de C<sub>3</sub>A et 10% de C<sub>4</sub>AF. Ses caractéristiques physiques et mécaniques sont données respectivement dans le tableau II.2.

**Tableau II.1** Composition chimiques du ciment

Oxydes	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	PAF	CaO <sub>libre</sub>
Teneur(%)	60,24	5,69	23,25	3,36	0,74	0,27	0,45	1,94	1,67	0,98

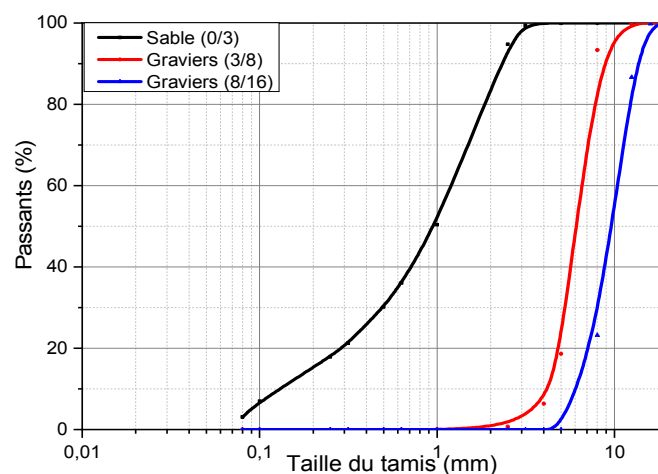
**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Tableau II.2** Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment utilisé

Désignations	Type 1
Densité apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1013
Densité absolue (kg/m <sup>3</sup> )	3060
Refus au tamis 100 $\mu$ (%)	1,71
Surface Spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3726
Consistance normale (%)	28
Début de prise (h/min)	2h37min
Fin de prise (h/min)	4h09min
Résistance à 28 jours (MPa) :	
• Compression	36
• Traction par flexion	7

### II.2.2 Les granulats

Les granulats utilisés sont du type concassé à différentes fractions granulaires : 0/3 pour le sable, 3/8 et 8/16 pour les graviers. Ils sont produits dans la carrière « SNC Granulats Grouz Frères Benissaad » de Djebel Grouz Ain-Melouk de Mila. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon selon la norme NF EN933-1 [2]. La distribution granulométrique des granulats utilisés est représentée sur la figure II.1 :



**Figure II.1** Courbes de la distribution granulométriques des granulats utilisées



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les principales caractéristiques des granulats utilisés sont données dans le tableau II.3 :

**Tableau II.3** Caractéristiques des granulats utilisés

Caractéristiques	Sable	Gravillon	Gravier
Masse volumique apparente (kg /m <sup>3</sup> ), NF P 18-555[3]	1445,8 2600	1411,92 2630,89	1412,21 1362,97
Masse volumique absolue (kg /m <sup>3</sup> ), NF P 18-555[3]	3.002	-	-
Module de finesse, NF P 18-540 [4]	70	-	-
Équivalent de sable(%), NF P 18-598,[5]	1.24	1.24	1.24
Coefficient d'absorption(%), NF P 18-555 [3]	-	-	20
Los Angeles(%), NF EN 1097-2, [6]			

### II.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des différents mélanges est l'eau qui alimente le laboratoire de génie civil de l'université de Constantine. C'est une eau potable du robinet conforme à la norme NF EN 1008, 2003, [7].

### II.2.4 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est le SUPERIOR RM 34. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau destiné à la confection des bétons de très haute qualité. Il est conçu à base de poly carbones de silicates modifiés et il est compatible avec tous les types de ciments. Le dosage du SUPERIOR RM 34 varie entre 0,6 et 2,0 % du poids du ciment. Il est commercialisé par l'entreprise TEKNACHEM conforme à la norme EN934-2 [8].

Les caractéristiques de SUPERIOR RM 34 sont présentées dans le tableau II.4:

**Tableau II.4** Caractéristiques de l'adjuvant utilisé

Aspect	Liquide
PH	4 à 5
Densité	1,1 ± 0,03
Teneur en chlorures	≤ 0,1 %
Extrait sec	26% ± 0,2
Couleur	Miel

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### II.2.5 Les fibres

Deux types de fibres sont utilisés dans le renforcement des bétons dans notre étude, des fibres naturelles d'origine végétales et des fibres synthétiques.

#### II.2.5.1 Les fibres végétales

Ce sont les fibres d'alfa et de chanvre.

##### II.2.5.1.1 Les fibres d'alfa

Les feuilles alfa utilisées proviennent de la région D'Ain-Touta à 35 km de la ville de Batna. Ces feuilles ont été coupées en fibres de 2cm de diamètre moyen de l'ordre de 10.2 à 1082  $\mu\text{m}$ .

Les fibres d'alfa sont très poreuses en raison de la présence de nombreux poils courts et fins à l'intérieur des feuilles (figure II.3), c'est pourquoi elles ont été imprégnées d'eau pendant 2 h avant leur incorporation dans le béton, afin de limiter l'absorption d'eau de gâchage.

Le tableau II.5 donne les caractéristiques physico-chimiques des fibres d'alfa utilisées.

**Tableau II.5** Les caractéristiques de la fibre d'alfa utilisé

Composition chimique (%)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cellulose : 56,</li><li>• Hémicellulose : 10.9</li><li>• Pectine : 20.1</li><li>• Lignine : 6</li></ul>
Résistance à la traction (Mpa)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 59 - 857</li></ul>
Module d'élasticité (GPa)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 38 - 58</li></ul>
Densité ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1400</li></ul>
Porosité (%)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 85-105</li></ul>
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	<ul style="list-style-type: none"><li>• 16 - 50</li></ul>

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



Figure II.2 Les fibres d'alfa utilisées

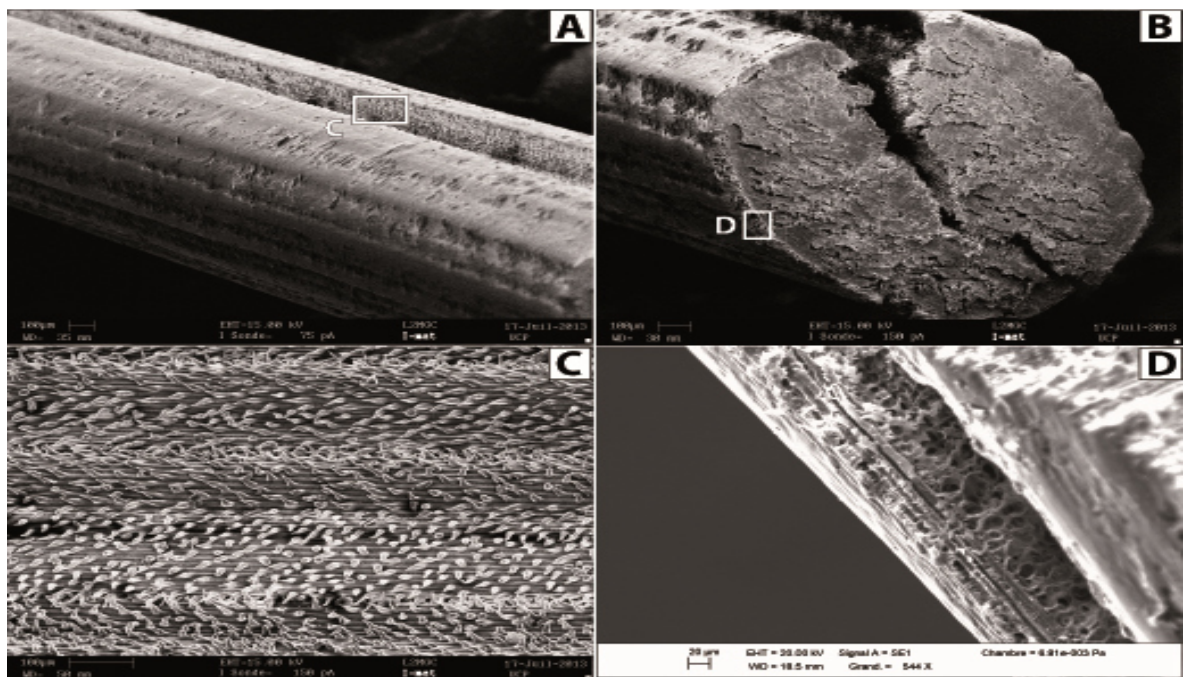


Figure II.3 Microscopie des fibres d'alfa utilisées

(A) Coupe transversale; (B) Coupe longitudinal interne (notez l'importance de la porosité interne); (C) zoom sur la partie interne de la fibre montrant la présence de nombreux poils courts et fins; (D) zoom sur la partie externe de la fibre montrant un épiderme mince et poreux [4]

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

*II.2.5.1.2 Les fibres de chanvre*

La plante chanvre fournit trois Co- produit : la graine, la fibre et la chènevotte. Les fibres de chanvre proviennent de la partie extérieure de la tige par une étape de défibrage par battage mécanique. Le processus d'extraction de ces fibres se déroule en plusieurs étapes : la récolte, le rouissage sur champ et l'exploitation de la paille de chanvre.

Dans notre étude, le chanvre provient du Canada et la longueur utilisée pour le renforcement du béton est 2 cm (figure II.6).

Le tableau II.6 donne les caractéristiques physico-chimiques des fibres de chanvre utilisées :

**Tableau II.6** Caractéristiques de la fibre de chanvre utilisé.

Composition chimique (%)	Cellulose : 56, Hémicellulose : 10.9 Pectine : 20.1 Lignine : 6
Résistance à la traction (Mpa)	59 - 857
Module d'élasticité (GPa)	38 - 58
Densité (kg / m <sup>3</sup> )	1400
Porosité (%)	85-105
Diamètre (µm)	16 - 50



**Figure II.4** Les fibres de chanvre utilisées

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### II.2.5.1.3 Les fibres Synthétiques

Les fibres synthétiques utilisées dans cette étude de recherche sont les fibres de polypropylène. Elles sont fabriquées à partir de propylène, de la marque TUF-STRAND MAXTEN provenant Canada. Ces fibres de longueur  $L = 2\text{cm}$  sont conformes à la norme ASTM C 1116, Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete (figure II.5).

Les caractéristiques de fibres de polypropylène utilisées sont données dans le tableau II.7.



**Figure II.5** Les fibres de polypropylène utilisées

**Tableau II.7** Les caractéristiques de la fibre de polypropylène utilisé

Densité relative	0,91
Dosage recommandé	1,8 à 3,0 kg/m <sup>3</sup>
Longueurs offertes	19 mm ( $\frac{3}{4}$ po), 38 mm (1 $\frac{1}{2}$ po)
Rapport d'élanement	39:79
Résistance à la traction	600 à 650 MPa
Point de fusion	165°C
Absorption d'eau	Négligeable

### II.3 Formulation des bétons

La méthode utilisée pour la formulation du notre béton ordinaire est la méthode de Dreux-Goriss. Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton recherché.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Pour appliquer la méthode de DREUX GORISSE nous devons suivre les étapes suivantes:

- **La résistance souhaitée**

Elle est définie par la résistance caractéristique en compression à 28 jours « $f_{c28}$ ». Lors de la formulation et pour tenir compte de la dispersion des résultats et de l'écart quadratique, on vise une résistance moyenne à 28 jours « $f_{m28}$ » supérieure à la résistance caractéristique à 28 jours  $f_{m28} > f_{c28}$ , avec  $f_{c28} = f_{m28} - 0.8s$  (0.8 pour un coefficient de variation de 20%). Pour cette recherche, la résistance caractéristique désirée à 28 jours a été fixée à 25 MPa. En admettant un coefficient de variation moyen de 15%, on peut adopter la règle approximative pour le calcul de la résistance moyenne visée :  $f_{m28} = f_{c28} + 15\% f_{c28}$ , d'où  $f_{m28} = 1.15.f_{c28} \approx 29$  MPa.

- **Consistance désirée**

Généralement, elle est définie par l'affaissement mesuré au moyen du cône d'Abrams "A", elle est fonction de la nature de l'ouvrage, de la difficulté du bétonnage et des moyens de serrage. Dans notre travail, nous avons opté pour un béton plastique avec un serrage de type courant, avec un affaissement compris entre 6 et 9cm.

- **Dimension maximale des granulats**

La dimension maximale des granulats  $D_{max}$  est fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive. Dans la présente recherche on a utilisé un  $D_{max} = 16$  mm.

- **Détermination du rapport C/E**

Le rapport C/E dépend de la résistance souhaitée, il est déterminé à partir de la formule de BOLOMEY. Dans notre étude nous avons pris le rapport  $C/E = 2$

- **Dosage en ciment C**

Le dosage en ciment C est fonction de l'environnement de l'ouvrage, c'est-à-dire de l'agressivité du milieu où se trouve l'ouvrage et de la résistance souhaitée. Il est déterminé par des abaques en fonction du rapport C/E et l'ouvrabilité souhaitée. Dans

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

cette étude le rapport C/E est de 2 et l'ouvrabilité souhaitée est comprise entre 6 et 9cm, d'où on trouve  $C = 350 \text{ kg/m}^3$ .

### • Détermination du dosage en eau E

La quantité d'eau E nécessaire pour la confection du béton se calcule à partir du rapport C/E et du dosage en ciment C. Pour un dosage en ciment  $C = 350 \text{ kg/m}^3$  et un rapport  $C/E = 2$ , on trouve  $E = 175$  litres.

### • Détermination du dosage des granulats

Le dosage des granulats est déterminé après le traçage de la courbe de référence OAB et la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> lignes de partage, sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR. Les coordonnées de la courbe de référence sont :

- Coordonnées de B ( $D_{\text{max}}, 100\%$ ),
- Coordonnées de A ( $X = D_{\text{max}}/2, Y = 50 - \sqrt{D_{\text{max}} + K}$ )

Avec un module de finesse du sable de :  $M_f = 3,002 = K$

$X = D_{\text{max}} / 2 = 16/2 = 8 \text{ mm}$ .

$Y = 50 - \sqrt{D_{\text{max}} + K} = 50 - 4 + 3.002 = 49.002\%$ .

D'où : A (8mm, 49.002%).

B (16mm, 100%).

Avec la figure II. 6 de la courbe d'analyse granulométrique qui donne le pourcentage du sable et le pourcentage total de gravillons :

- Le pourcentage du sable = 43%;
- Le pourcentage du gravillon 4/8 = 6%;
- Le pourcentage du gravillon 8/16 = 51%.

- Volume total absolu :  $1000\gamma = 820$  litres

En adoptant pour le coefficient de compacité des granulats, la valeur  $\gamma = 0,820$

La compacité du ciment  $C = \gamma - 0.03 = 0.820 - 0.03 = 0.79$

Volume absolu du ciment :  $V_C = 350/3,1 = 0.113$

Volume absolu des granulats :  $V_{AG} = C - V_C$  donc  $V_{AG} = 0.79 - 0.113 = 0.677$

Volume des granulats :  $V_G = 825 - 112.90 = 712.1$  litres

Volume absolu du sable :  $V_{AS} = 0.677 * 0.43 = 0.2911$  litres

Volume absolu du gravillon 4/8 :  $V_{AS1} = 0.677 * 0.6 = 0.4062$  litres

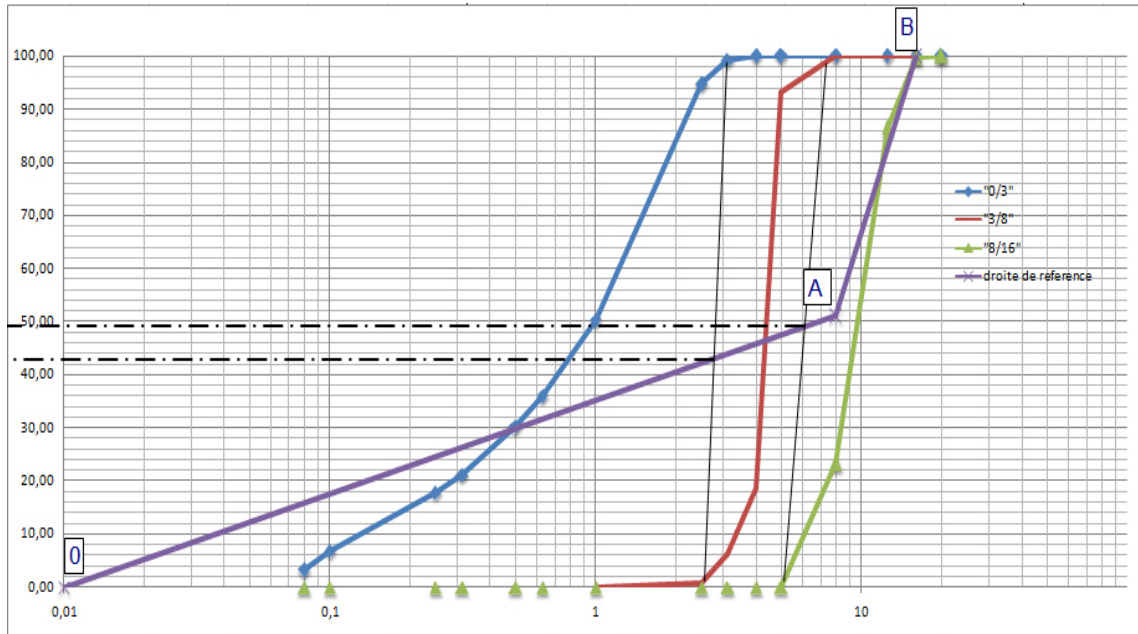
**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Volume absolu du gravillon 8/16 :  $V_{AS2} = 0.677 \times 0.51 = 0.3453$  litres

Poids du sable :  $P_S = 0.2911 \times 2.5 = 0.72775$  t

Poids des gravillons 3/8 :  $P_{G1} = 0.04 \times 2.67 = 0.1068$  t

Poids des granulats 8/16 :  $P_{G2} = 0.3453 \times 2.6 = 0.8977$  t



**Figure II.6** Détermination de la composition granulatoire du béton ordinaire

Les constituants de  $1 \text{ m}^3$  du béton sont présentés dans le tableau II. 8 :

**Tableau II.8** Composition de  $1\text{m}^3$  de béton ordinaire

Constituants	Ciment	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau
La quantité (Kg)	350	727	106	897	175

**II.3.1 Les bétons étudiés**

Notre objectif est de confectionner un béton de structure de classe C25/30 avec trois rapport E/C à savoir 0.4, 0.5 et 0.6 selon la norme NF EN 206-1.

Pour cela sept types de béton ont été formulés selon la méthode de Dreux-Gorisse :

- Trois bétons à base de fibres de chanvre (HC: Hemp Concrete), HC-0.25; HC-0.5, HC-1, contenant respectivement 0,25, 0,5 et 1 % de fibres de chanvre en volume.



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- Deux types bétons à base de fibres d'alfa (AC: Alfa Concrete), AC-1 et AC-1.5, contenant respectivement 1 et 1,5% de fibres de alfa en volume.
- Deux bétons témoins l'un renforcé de fibres de Polypropylène (PC: Polypropylene Concrete) et l'autre un béton ordinaire (OC: Ordinary Concrete).

Les fibres ont été mélangées avec les agrégats et le ciment avant l'addition de l'eau pour assurer leur bonne répartition dans le composite.

Les proportions des bétons confectionnés sont données dans les tableaux II.9, II.10 et II.11 :

**Tableau II.9** Proportion du mélange pour 1m<sup>3</sup> des bétons de référence (OC, PC)

Rapport E/C	E/C =0.4		E/C =0.5		E/C =0.6	
	OC	PC	OC	PC	OC	PC
Type de béton	OC	PC	OC	PC	OC	PC
C(kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	350	350
S : 0/3(kg/m <sup>3</sup> )	727	727	727	727	727	727
G1 : 3/8(kg/m <sup>3</sup> )	109	109	109	109	109	109
G2 : 8/16(kg/m <sup>3</sup> )	897	897	897	897	897	897
E (kg/m <sup>3</sup> )	140	140	175	175	210	210
SP : (kg/m <sup>3</sup> )	3.465	3.465	2,31	2,31	-	-
Fibres PP : (kg/m <sup>3</sup> )	-	1.8	-	1.8	-	1.8

**Tableau II.10** Proportion de mélange pour 1m<sup>3</sup> du béton d'Alfa (AC)

Rapport E/C	E/C =0.4		E/C =0.5		E/C =0.6	
	AC-1	AC-1.5	AC-1	AC-1.5	AC-1	AC-1.5
Type de béton	AC-1	AC-1.5	AC-1	AC-1.5	AC-1	AC-1.5
C : (kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	350	350
S : 0/3(kg/m <sup>3</sup> )	727	727	727	727	727	727
G1 : 3/8(kg/m <sup>3</sup> )	109	109	109	109	109	109
G2 : 8/16(kg/m <sup>3</sup> )	897	897	897	897	897	897
E : (kg/m <sup>3</sup> )	140	140	175	175	210	210
SP : (kg/m <sup>3</sup> )	3.465	3.465	2,31	2,31	-	-
Fibres A : (kg/m <sup>3</sup> )	7.6	11.4	7.6	11.4	7.6	11.4

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Tableau II.11** Proportion de mélange pour 1m<sup>3</sup> du béton de Chanvre (HC)

Rapport E/C	E/C=0.4	E/C =0.5			E/C=0.6
Type de béton	HC-25	HC-0.25	HC-0.5	HC-1	HC-25
C : (kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	350
S : 0/3(kg/m <sup>3</sup> )	727	727	727	727	727
G1 : 3/8(kg/m <sup>3</sup> )	109	109	109	109	109
G2 : 8/16(kg/m <sup>3</sup> )	897	897	897	897	897
E : (kg/m <sup>3</sup> )	140	175	175	175	210
SP : (kg/m <sup>3</sup> )	3.465	2,31	3.465	3.465	-
Fibres C : (kg/m <sup>3</sup> )	2	2	4	8	2

#### **II.4 Méthodes expérimentales**

Les fibres sont des additifs et non pas des composants de substitution à une partie du ciment, du sable ou des agrégats. Elles sont considérées comme des fibres de couture et leur apport en masse est négligeable comparé aux pourcentages des autres composants.

Dans le cas des bétons de fibres d'alfa, de chanvre et de polypropylène (AC, HC et PC), les fibres sont mélangées avec le ciment et les granulats avant l'ajout de l'eau pour une meilleure répartition des fibres dans tout le mélange et éviter que les fibres ne s'agglomèrent et n'adhèrent entre elles et ne forme des pelotes qui empêcheraient l'homogénéisation du composite.

Les fibres d'alfa et de chanvre non traitées ont été immergées dans de l'eau pendant 2 heures jusqu'à saturation, afin d'éviter l'absorption de l'eau de gâchage par les fibres lors de la confection des bétons.

Après le malaxage à sec et humide des différents constituants dans un malaxeur à axe vertical et à mouvement planétaire (figures II.7 et II.8), des essais à l'état frais et à l'état durci ont été effectués.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure II.7** Malaxage sec



**Figure II.8** Malaxage humide

Les éprouvettes ont ensuite été conservées à l'air libre dans une salle à température constante égale à  $20 \pm 2$  ° C et ayant une humidité relative de  $50 \pm 5\%$ , jusqu'aux jours de l'écrasement à 7, 28, 90 et 120 jours.

Pour chaque formulation du béton, des éprouvettes cylindriques (11x22cm), et des éprouvettes prismatiques (7x7x28 cm) ont été confectionnées (Figures II.9 et II.10).



**Figure II.9** Prismes 7x7x28cm



**Figure II.10** Cylindres 11x22cm

## **II.5 Caractérisation des différents bétons confectionnés**

Les essais de caractérisation des bétons à l'état frais et à l'état durci que nous avons effectués sont les suivants :

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### II.5.1 A l'état frais

#### II.5.1.1 Ouvrabilité au cône d'Abrams

La consistance ou l'ouvrabilité d'un béton est un facteur très important, elle conditionne la facilité de mise en œuvre du béton (remplissage des coffrages et enrobage des armatures) et caractérise sa fluidité avant que le matériau ne durcisse.

Elle peut être mesurée par un essai d'affaissement en utilisant le cône d'Abrams de dimensions 16x32cm, connu aussi sous le nom de "Slump Test" (Figures II.11). En mesurant la hauteur d'affaissement après le démoulage du cône, on obtient une indication sur l'ouvrabilité du béton : plus la hauteur d'affaissement est importante, plus le béton est fluide. En ajustant la composition des bétons (principalement par l'emploi d'adjuvants), il est possible de modifier la consistance du béton ainsi que la durée pendant laquelle il reste "ouvrable".



**Figure II.11** Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Les classes de consistance ou les classes d'affaissement permettent de caractériser l'ouvrabilité des bétons et de le classer selon la norme NF 18-451 [9] à l'aide du cône d'Abrams. Les différentes classes de consistance sont présentées dans le tableau II.12 :

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

**Tableau II.12** Classes d'affaissement du béton

Classe	Affaissement (cm)	Type de béton
S1	1-4	Ferme
S2	5-9	Plastique
S3	10-15	Très plastique
S4	16-21	Fluide
S5	>22	Très fluide ou BAP

#### II.5.1.2 Mesure de la masse volumique

La densité réelle du béton frais est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres rempli de béton selon un moule de remplissage analogue à celui utilisé pour le remplissage des éprouvettes cylindriques et prismatiques. La procédure de l'essai de densité est effectuée suivant les conditions de NF EN 12350-6 [10].

La densité est calculée par la formule suivante :  $\rho = (P - P_0) / V$

Avec :

- **P** : la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle)
- **P<sub>0</sub>** : la masse du récipient vide
- **$\rho$**  : la densité du béton frais
- **V** : le volume du récipient (8 litres).

#### II.5.2 A l'état durci

##### II.5.2.1 Propriétés mécaniques : Résistances mécaniques et module de Young

Les essais de compression simple sont réalisés à 7, 28, 90, 120 jours par un écrasement des éprouvettes de bétons cylindriques 11x22cm, sous une presse de type CONTROLS (Figure II.12). 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. Chaque valeur est la moyenne de trois valeurs. Les tests de compression ont été effectués selon la norme NF P15-471 [11].

Les essais de la flexion à trois points sont réalisés à 7, 28, 90, 120 jours de durcissement du béton sur des éprouvettes prismatique 7x7x28cm. Les essais sont

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

effectués avec une presse hydraulique de type CONTROLS (Figure II.12) selon la norme NF EN 12390-5 [11].

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinale est la constante qui relie la contrainte de traction ou de compression et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope. Dans notre cas, le module d'Young a été mesuré selon la norme européenne NF P 18-414 [12].



**Figure II.12** Machine d'écrasement des différents essais

### II.5.2.2 Propriétés physiques

#### II.5.2.2.1 *La porosité accessible à l'eau*

La porosité accessible à l'eau est mesurée selon la recommandation de l'AFPC-AFREM [13]. Pour les différents bétons, elle est mesurée sur trois échantillons prismatiques de dimensions 7x7x7cm, obtenus à partir du sciage d'une éprouvette de dimensions 7x7x28 cm.

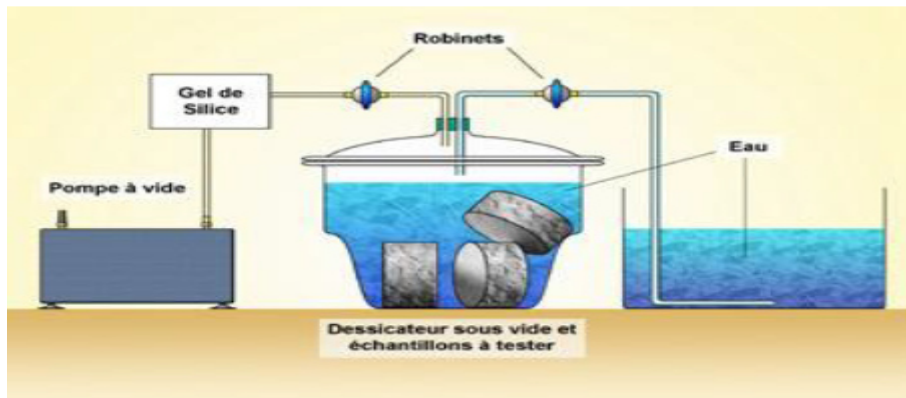
Les échantillons ont été préalablement séchés dans une étuve à 60° C, jusqu'à stabilisation de la masse (Md) par la suite, l'air présent dans les pores des bétons a été évacué à l'aide d'une pompe à vide. La masse des cubes du béton entièrement saturés a été mesurée sous l'eau (MSW) et dans l'air (MSA) comme le montrent les figures II.13 et II. 14. La porosité totale (P) a été calculée en utilisant l'équation :

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100$$

Avec :

- $M_{\text{air}}$  : masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'air;
- $M_{\text{sec}}$  : masse de l'échantillon sec (étuvé à 60°C);
- $M_{\text{eau}}$  : masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'eau.



**Figure II.13** Dispositif utilisé pour la détermination de la porosité totale à l'eau



**Figure II.14** Pesée hydrostatique

**II.5.2.2.2 L'absorption capillaire**

L'absorption capillaire a été mesurée en 24 heures selon la recommandation de l'AFPC AFREM [13]. Elle a été mesurée sur trois échantillons de dimensions 7x7x7 cm obtenus par le sciage des éprouvettes de dimensions 7x7x28cm.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Les échantillons des différents bétons sont préalablement séchés dans une étuve à 60°C pendant 24 heures, et laissés se refroidir à l'air libre pendant 14 heures. Les surfaces latérales des échantillons sont assemblées avec du Scotch pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis leurs surfaces sciées sont placées à 0.5 cm de hauteur d'eau (Figure II.15). Les pesées sont réalisées aux échéances de 1/2h, 1h, 2h, 4h, 7h et 24h.

Pour chaque échéance de mesure, le coefficient d'absorption est calculé par la formule :

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

Avec:

- $M_T$ : masse de l'échantillon à l'échéance T;
- $M_0$ : masse initiale de l'éprouvette séchée dans une étuve à 60°C;
- A: aire de section de l'éprouvette égale à 0.07x0.07 m<sup>2</sup>.



**Figure II.15** Essai d'absorption capillaire.

### II.5.2.2.3 La perte de masse

Consiste à mesurer la quantité d'eau qui s'évapore d'une éprouvette de béton, elle est effectuée sur des échantillons prismatiques 7x7x28 cm avec des mesures à 7, 28, 90 et 120 jours.



## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

La perte de masse  $P_m(t)$  est définie par le rapport :  $P_m(t) = [m(t) - m_0] / m_0$ . Où  $m_0$  est la masse de l'éprouvette après coulage et  $m(t)$  est la masse de l'éprouvette à l'instant  $t$ . La perte de masse a été mesurée avec une balance avec une précision de  $\pm 0,01$  g.

### **II.6 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de présenter les essais de caractéristiques des matériaux de base des différents mélanges à savoir le ciment, les granulats, l'adjuvant.

Les constituants sont conformes aux normes et recommandations en vigueur. Ce qui nous a facilité l'adoption d'une approche de formulation adéquate.

Nous avons également présenté les protocoles d'essais utilisés pour la détermination des propriétés physiques pour le calcul de la porosité, l'absorption capillaire, la perte de masse), et les propriétés mécaniques comme la résistance à la compression à la compression et à la traction par flexion des bétons confectionnés.

### **II.7 Références bibliographiques**

- [1] NA 442, "*Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*", Algérie 2005.
- [2] NF P 18-554, "*Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et des cailloux*", normalisation française, Décembre 1990.
- [3] NF P 18-555, "*Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables*", normalisation française, Décembre 1990.
- [4] NF P 18-540, "*Granulats, Définitions, conformité, spécifications*" Normalisation française, 1990.
- [5] NF P 18-598, "*Équivalent de sable*", Normalisation française Octobre 1991.
- [6] NF P 18-573, "*Essai Los Angeles*", Normalisation française Octobre 1991.
- [7] NF EN 1008, "*Eau de gâchage pour bétons -Spécifications d'échantillonnage, d'essais de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*" indice de classement : P18-211, 2003.
- [8] NF EN934-2, "*Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*", 2012.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

[9] NF EN 12350-2, "*Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement Testing Fresh concrete - Part 2: Slump test*", in french 2012.

[10] NF EN 12350-6, "*Essais pour béton frais - Partie 6 : masse volumique*", French: AFNOR, Avril 2012.

[11] NF P15-471, "*Essais des Bétons – Essais Destructifs*", Norme Française homologuée, 1990.

[12] NF P 18-414, "*Essais des Bétons – Essais Non Destructifs*". *Mesure de la Fréquence de Résonance Fondamentale [Testing of concrete - non-destructive testing - Measurement of the fundamental resonance frequency]* , French: AFNOR, 1993.

[13] AFPC- AFREM, "Recommended methods for measuring of durability parameters. Proceedings of the technical AFPC/AFREM, days on concrete durability, Toulouse (pp.125–134).11 and 12 December 1997.

## **Chapitre III. Etude des propriétés physico-mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales**

### **III. Etude des propriétés physico-mécaniques des bétons renforcés de fibres végétales**

#### **III.1 Introduction**

La recherche sur les bétons renforcés de fibres naturelles, dits « bétons écologiques » ou « bétons respectueux de l'environnement » intéresse de plus en plus les chercheurs dans le domaine du génie civil, comme une alternative de fibres classiques comme l'amiante, le verre, le carbone ou encore l'acier.

Plusieurs paramètres peuvent impacter le comportement des bétons renforcés de fibres végétales, comme le dosage et la longueur des fibres, le rapport E/C ou encore le type de ciment utilisé.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'impact des fibres alfa et de chanvre sur les propriétés mécaniques et physiques des bétons de structure. Les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres de alfa (Alfa Concrete: AC) et de chanvre (Hemp Concrete: HC) sont comparées à celles d'un béton ordinaire (Ordinary Concrete: OC) et d'un béton renforcé de fibres de polypropylène (Polypropylene Concrete: PC) pour évaluer la possibilité de confection d'un béton vert de structure.

Différents dosages de fibres d'alfa et de chanvre ont été incorporés au béton pour déterminer la quantité optimale de ces fibres et obtenir des bétons de structure écologique et résistants.

Les essais à l'état frais comme l'affaissement et la densité et les essais à l'état durci comme les résistances à la compression et la traction par flexion ainsi que le module d'Young, la porosité, l'absorption capillaire et la perte de masse ont été réalisés au laboratoire de génie civil de l'université des Frères Mentouri Constantine 1.

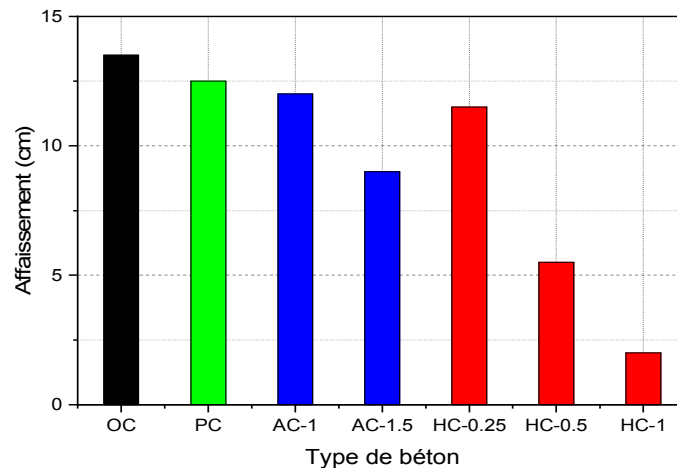
L'impact du paramètre Eau/Ciment sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons a aussi été étudié dans ce chapitre.

### III.2 Effet des caractéristiques des fibres végétales sur les performances physico-mécaniques du béton

#### III.2.1 A l'état frais

##### III.2.1.1 Essai d'affaissement ou Slump Test

Les résultats de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams des bétons confectionnés sont présentés dans la figure III.1



**Figure III.1** L'affaissement au cône d'Abrams des bétons confectionnés

D'après les résultats obtenus, trois classes de béton peuvent être distinguées :

- Bétons très plastiques de classe S3 (110 - 140 mm) : OC, HC-0.25, AC-1 et PC.
- Béton plastique de classe S2 (80mm) : AC-1.5.
- Bétons fermes S1 (<50 mm) : HC -0.5 et HC-1.

On constate que l'incorporation des fibres que ce soit végétale ou synthétique affecte le comportement rhéologique du béton à l'état frais, ce dernier est plus significatif pour les fibres naturelles dont la porosité reste élevée malgré leurs imprégnation dans l'eau avant le gâchage. Ces fibres continuent à absorber une partie de l'eau de gâchage lors de la confection du béton, ce qui réduit son ouvrabilité. L'affaissement est inversement proportionnel au le dosage de fibres. Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures sur l'impact des fibres végétales sur l'affaissement des composites cimentaires [1-3].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

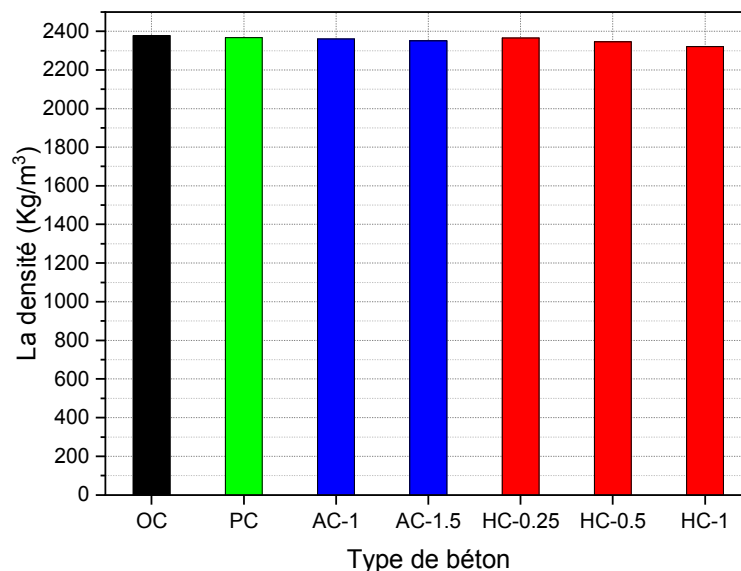
Aucun changement significative de l'ouvrabilité des bétons HC-0.5 et HC-1 n'a été observé malgré l'augmentation du dosage de superplastifiant. Ils sont restés dans la plage des bétons fermes, ceci est dû à l'effet boulet des fibres de chanvres qui empêchent l'hydratation et le malaxage du mélange comme le confirme la bibliographie [4,5].

Notons qu'un dosage de super plastifiant a été ajouté aux mélanges pour maintenir un niveau d'ouvrabilité approprié et obtenir un béton de structure facile à mettre en place.

Une légère réduction de l'affaissement est notée lors de l'incorporation des fibres de polypropylène, causée par la quantité d'eau restée sur les surfaces des fibres. Même si ces dernières n'absorbent pas d'eau, une petite quantité d'eau est adsorbée par la surface des fibres.

### III.2.1.2 La masse volumique

La densité de chacun des bétons confectionnés est représentée par la figure III.2 :



**Figure III.2** Les résultats de la densité des bétons confectionnés

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

On remarque que l'incorporation des fibres dans les mélanges de béton influe/ sur sa masse volumique à l'état frais, elle augmente la teneur des vides sous l'effet de l'air occlus, particulièrement lorsque leur dosage en fibres augmente et entraîne une mauvaise dispersion de ces fibres lors du gâchage [6].

On remarque également que les caractéristiques de fibres peuvent influencer sur la densité des bétons, comme c'est le cas du PC dont la densité est inférieure à celle du HC malgré un taux égal de fibres, du fait que le diamètre des fibres de polypropylène est supérieur à celui des fibres de chanvre.

### III.2.2 A l'état durci

#### III.2.2.1 Les propriétés mécaniques

##### III.2.2.1.1 Résistance à la compression

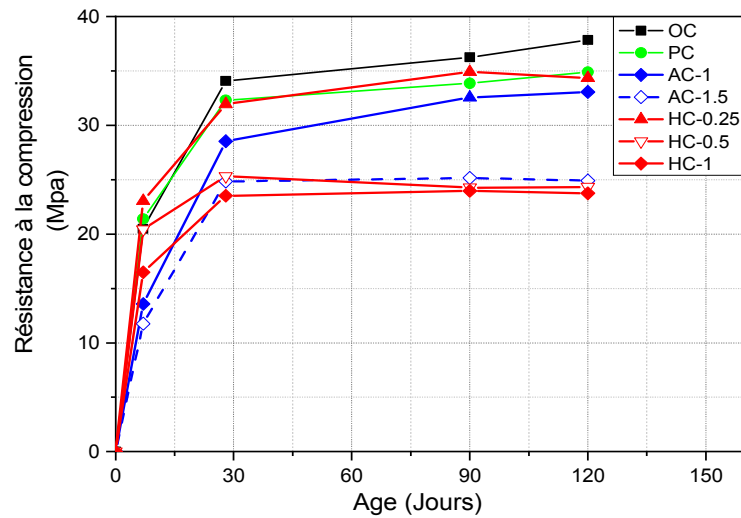
Les essais à la compression simple ont été effectués sur les échantillons cylindriques 11x22 cm, comme le montre la figure III.3 :



**Figure III.3** Essais à la compression simple réalisés sur un béton HC-0.25

La variation de la résistance à la compression des différents bétons confectionnés à 7, 28, 90 et 120 jours de maturation est présentée sur la figure III.4 :

### Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



**Figure III.4** Résistance à la compression des bétons étudiés

Les résultats montrent que l'incorporation des fibres dans les bétons entraîne une diminution de la résistance à la compression. Cette diminution devient significative quand on augmente la teneur de fibres à court ou à long terme. Pour le béton renforcé de fibres d'alfa, la diminution est près de 15% pour AC-1 et 29 % pour le AC-1.5 à 120 jours. Pour le béton renforcé de fibres de chanvre, la diminution est estimée à 11,93%, 35,73% et 37,26% respectivement pour le HC-0.25, le HC-0.5 et le HC-1 à 120 jours comparé au béton témoin OC.

Seuls le HC-0.25 et AC-1, AC-1.5, PC restent dans la plage d'un béton de structure. Jusqu'à 28 et 120 jours, aucune différence significative n'est remarquée entre les résistances à la compression de chacun de ces composites.

La diminution de la résistance est due à la création d'un grand nombre de pores à cause de la mauvaise répartition des fibres dans la matrice cimentaire. En effet, lorsque la teneur en fibres augmente, la cohésion des composites diminue et la porosité augmente aussi, entraînant par la suite une baisse considérable de la résistance à la compression, ce qui est confirmé par la bibliographie sur le béton renforcé de fibres végétales [2, 3, 7, 8].



## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Si on compare les résistances des deux bétons à dosage optimal de chanvre et d'alfa, le HC-0.25 est le plus résistant à la compression comparé au AC-1, car les caractéristiques des fibres comme le diamètre et le taux de fibres moins importants pour le AC-1 comparé au HC-0.25.

Comparés aux résistances à la compression du PC, les bétons de fibres AC-1 et HC-0.25 se comporte pratiquement de la même manière à cours comme à long terme. On peut conclure que les fibres de chanvre et d'alfa non traitées peuvent se substituer aux fibres de polypropylène pour donner naissance à un béton de structure économique, écologique et résistant.

### III.2.2.1.2 Résistance à la traction par flexion

Les essais de traction par flexion ont été effectués sur les échantillons prismatiques 7x7x28 cm, comme le montre la figure III.5 :

Les fibres de chanvre



**Figure III.5** Essais de traction par flexion réalisées sur le béton HC-0.25

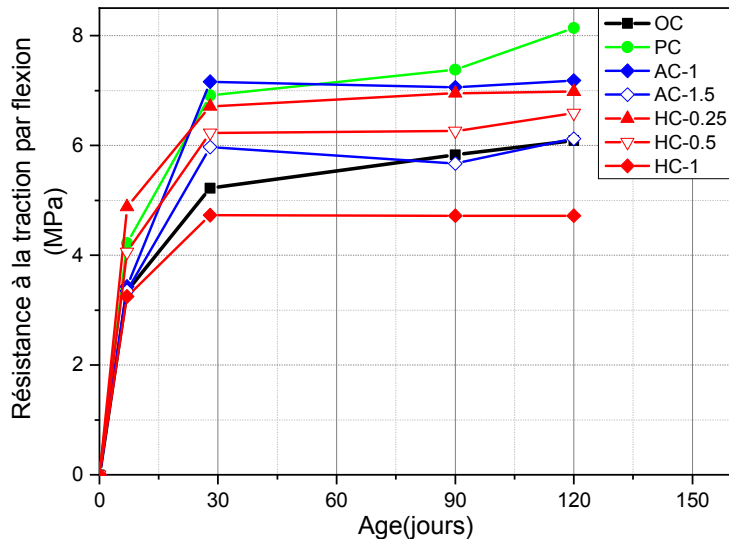
Les fibres d'alfa



**Figure III.6** Exemple de phénomène de couture des fibres d'alfa

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

La figure III.7 représente la variation de la résistance à la traction par flexion des bétons confectionnés à 7, 28, 90 et 120 jours :



**Figure III.7** Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés

D'après la figure III.7, comparé au (OC) la résistance à la traction par flexion des bétons renforcés des fibres de chanvre (HC) présente une augmentation significative de 21.75% pour un dosage de 0.25%, une légère augmentation de 3.12% pour un dosage de 0.50%, et une diminution importante de 21.13% pour un dosage de 1%. D'autre part, la résistance à la traction par flexion pour le béton d'alfa (AC) présente une augmentation estimée à 24% pour un taux de 1% et près de 1% pour un taux égal 1.5% comparé à celle du béton témoin (OC) à 90 jours.

L'augmentation de la résistance à la traction par flexion pour le HC-0.25 et AC-1 est justifiée les caractéristiques mécaniques de la fibre, qui une fois incorporée dans le mélange, limite la propagation et la progression des fissures par un effet de couture, ce qui augmente la résistance à la traction du composite en question, comme le confirme la bibliographie pour d'autres types de fibres végétales [2, 3, 9, 10].

D'autre part, la diminution de la résistance à la traction par flexion pour le HC-1, est due à la quantité des fibres incorporée dans le composite. Le phénomène

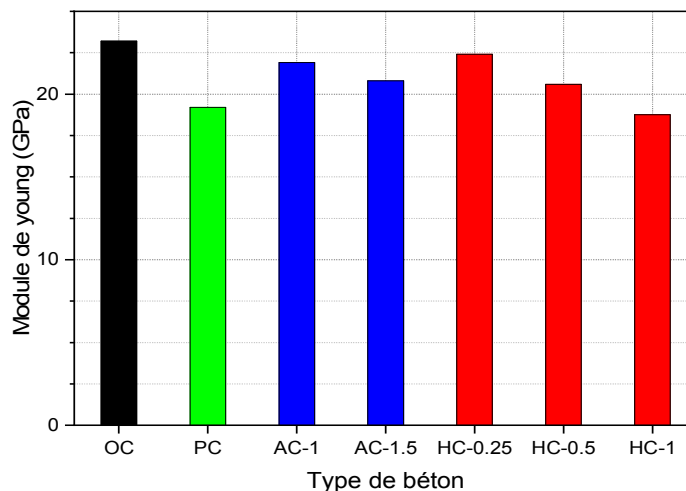
## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

d'agglomération est favorisé dans ce cas, ce qui va générer des zones avec un amas de fibres non adhésives dans la matrice cimentaire. Ce comportement est probablement due à l'effet de la superposition de deux phénomènes potentiels ; l'effet des fibres non uniformément dispersées dans la matrice et l'affaiblissement de la matrice cimentaire causé par de la création de vide et la réduction relative du volume en ciment [11,12].

Compte tenu des résistances à la compression et à la traction, nous pouvons conclure que le béton AC-1 et HC-0.25 est le composite ayant les meilleurs apports en fibres d'alfa et de chanvre pour la confection d'un béton de structure comparé au béton ordinaire (OC). Le PC donne de meilleures résistances à la traction.

### III.2.2.1.3 Le module d'élasticité dynamique

La figure III.8 représente les résultats du module d'élasticité dynamique pour tous les bétons étudiés à 28 jours :



**Figure III.8** Module de Young (dynamique) des bétons confectionnés à 28 jours

Les résultats montrent que l'incorporation des fibres dans le béton a entraîné une diminution de son module d'élasticité dynamique. Cette diminution est proportionnelle au dosage des fibres végétales. Comparé au OC, le béton de chanvre accuse une diminution estimée à 5.60% pour le HC-0.25, 11.20% pour le HC-0.5 et 15.94% pour HC-1. Quant aux bétons d'alfa, la diminution du module dynamique est de 3,45 % pour le AC-1 et 10.35% pour le AC-1.5.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

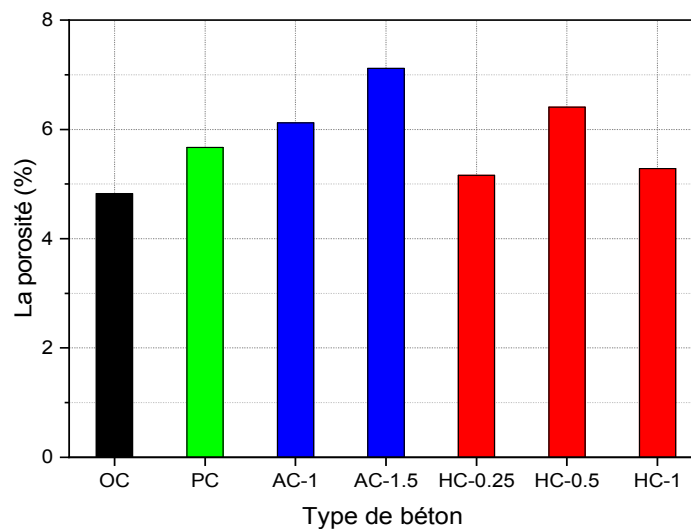
L'incorporation des fibres au composites cimentaires peut réduire ou augmenter la rigidité du béton en fonction de la nature de la fibre et donc de leur porosité [1,14,15].

D'autre part, on remarque que la diminution du module d'élasticité dynamique est plus significative pour l'AC1 et le PC à cause de leur porosité élevée, due au diamètre des fibres, qui est plus important que celui des fibres de chanvre.

### III.2.2.2 Les propriétés physiques

#### III.2.2.2.1 La porosité

La variation de la porosité en fonction de la teneur en fibres pour les bétons de chanvre (HC) et les bétons d'alfa (AC) à 28 jours sont représentée par la figure III.9 :



**Figure III.9** Porosité des bétons confectionnées à 28 jours.

D'après les résultats obtenus, la porosité varie entre 4,83 et 7,10% pour tous les bétons. On remarque que le béton ordinaire (OC) est le moins poreux et les bétons HC-0.5 et AC-1.5 les plus poreux.

La porosité totale à l'eau augmente pour 0,25 à 0,5% d'apport de chanvre et diminue pour 1%. Cette porosité augmente également pour 1 et 1.5% d'apport d'alfa. Des études de recherches antérieures sur les bétons renforcés par d'autres fibres végétales confirment nos résultats [16 ,17]. Le dosage à 1% de chanvre fait l'exception, qui se

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

traduit par la mauvaise dispersion des fibres de chanvre dans le béton pour un apport supérieur à 0,5%, car des pelotes de chanvre se forment causant des parties hétérogènes dans la matrice cimentaire et empêchent l'eau de rentrer dans certaines parties du composite en le rendant moins poreux.

L'augmentation de la porosité est liée à : (1) la porosité initiale des fibres naturelles, (2) la porosité de la matrice cimentaire, (3) la zone de transition interfaciale (ITZ) autour des fibres, cette ITZ se formerait lors du malaxage et serait due au coefficient d'absorption d'eau élevé des fibres naturelles [18, 19].

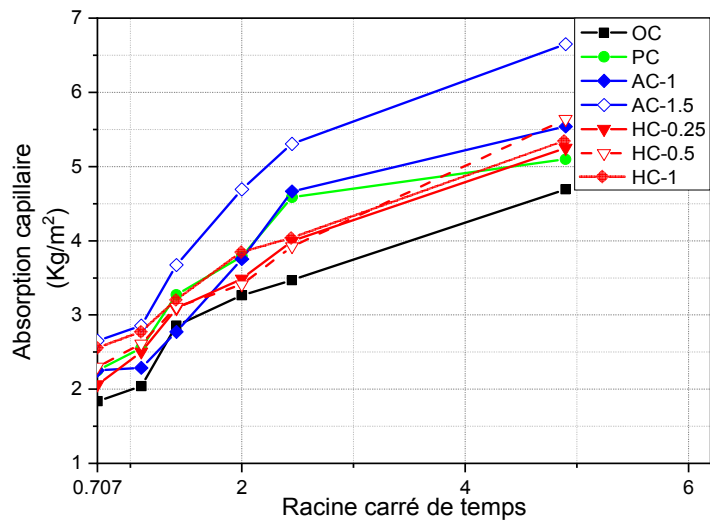
D'autre part, le diamètre des fibres influe sur la porosité des composites, c'est le cas des bétons AC-1 et PC qui sont plus poreux que le HC-0.25. Les diamètres des fibres de polypropylène et d'alfa sont plus importants que celui des fibres de chanvre.

On déduit que, La porosité est affectée par plusieurs facteurs, notamment la structure morphologique et le pourcentage de fibres dans le béton, plus le pourcentage de fibres est élevé et donc le nombre de pores augmente, plus la porosité est grande.

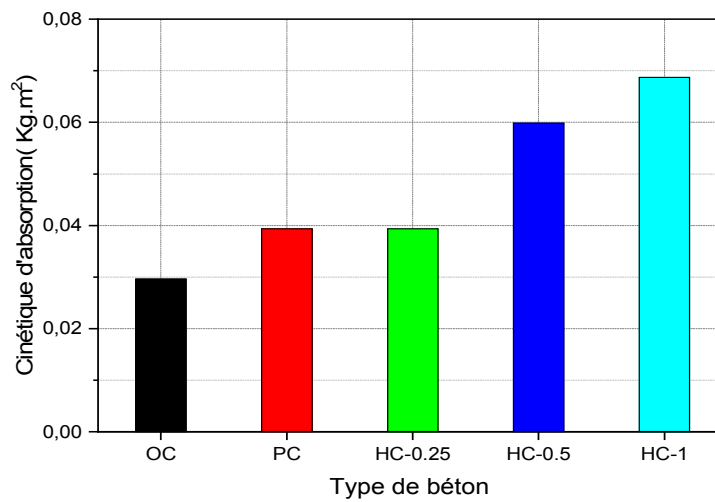
### *III.2.2.2.2 Absorption capillaire*

Les résultats de l'absorption par capillarité et sa cinétique d'absorption pour une durée de 24 heures dans l'eau, réalisés sur les bétons confectionnés sont représentés sur les figures III.10 et III.11 :

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure III.10** Absorption capillaire des différents bétons confectionnés



**Figure III.11** Cinétique d'absorption capillaire des différents bétons confectionnés.

L'absorption capillaire représente l'un des principaux mécanismes de transfert de l'eau et de la vapeur d'eau dans le béton.

A partir des résultats obtenus, on remarque une augmentation de l'absorption d'eau et de la cinétique d'absorption avec l'augmentation du taux de fibres pour les bétons de chanvre et d'alfa.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Ce comportement est due aux caractéristiques physiques des fibres et celles de la matrice cimentaire : (1) la capacité d'absorption d'eau élevée des fibres végétales causée par sa structure microporeuse, (2) l'augmentation de la porosité dans la matrice cimentaire, en particulier dans la zone de transition interracial (ZIT) pâte-fibres, (3) l'addition de faibles quantités d'eau en excès lors du gâchage, ce qui génère la formation d'une porosité supplémentaire comme indiqué dans la littérature [18, 20 , 21].

D'autre part, un volume élevé des fibres contribue à augmenter la capacité d'absorption d'eau. Les fibres végétales utilisés absorbent plus d'eau, ce qui affecte les résistances mécaniques du béton et la durabilité du composite.

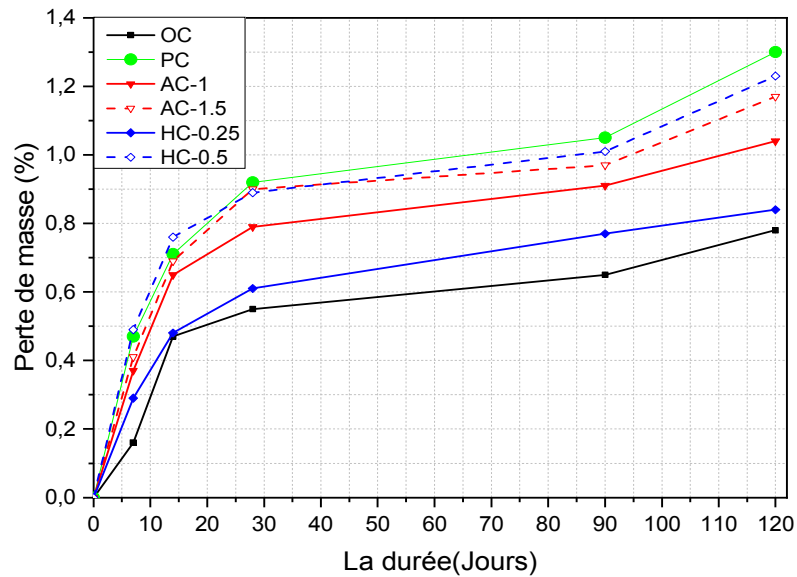
On constate que le type de la fibre influe considérablement sur les propriétés d'absorption des composites [22].

En comparant l'effet des fibres de chanvre et celui des fibres de polypropylène pour un même dosage, l'absorption d'eau et la cinétique d'absorption est pratiquement la même. La taille des fibres de polypropylène qui est plus importante que celle de la fibre de chanvre est équilibrée par le fait que le polypropylène n'absorbe pas d'eau.

### *III.2.2.2.3 La perte de masse*

Les mesures de la perte de masse permettent d'estimer l'intensité de migration de l'eau. Les mesures de la perte de masse lors du séchage des différents bétons confectionnées sont présentées sur la figure III.12:

### Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



**Figure III.12** Evolution de la masse totale des bétons confectionnés.

D'après les résultats représentés sur la figure III.12, on constate pour tous les bétons, l'existence d'une première étape avec une perte de masse qui varie entre 0 et 1,13% de 0 à 28 jours de séchage, suivie par une deuxième étape de durée plus longue, entre 28 et 120 jours, cette dernière est caractérisée par une perte de masse plus lente qui varie entre 0,55 et 1,52%. Ce comportement est lié à l'action des fibres incorporées dans le béton, qui agissent comme des drains pour la migration de l'eau vers l'extérieur [24].

Cette perte de masse est différenciée d'un béton à un autre. Pour le béton d'alfa et de chanvre la perte de masse est influencée par le dosage de fibres, si le dosage des fibres incorporées augmente, la perte de masse est importante sous l'effet de la porosité élevée créée par la quantité des fibres.

On remarque aussi que la perte de masse des bétons d'alfa (AC) et de chanvre (AC) est inférieure à celle du béton au polypropylène (PC). Ceci est expliqué par le fait que les fibres végétales peuvent retenir l'eau en raison de leur porosité, ce que le polypropylène ne peut pas faire.



### III.2.3 Observation au MEB de la microstructure

La figure II. 13 représente la microstructure au microscope électronique à balayage des bétons AC-1, 'PC et OC :

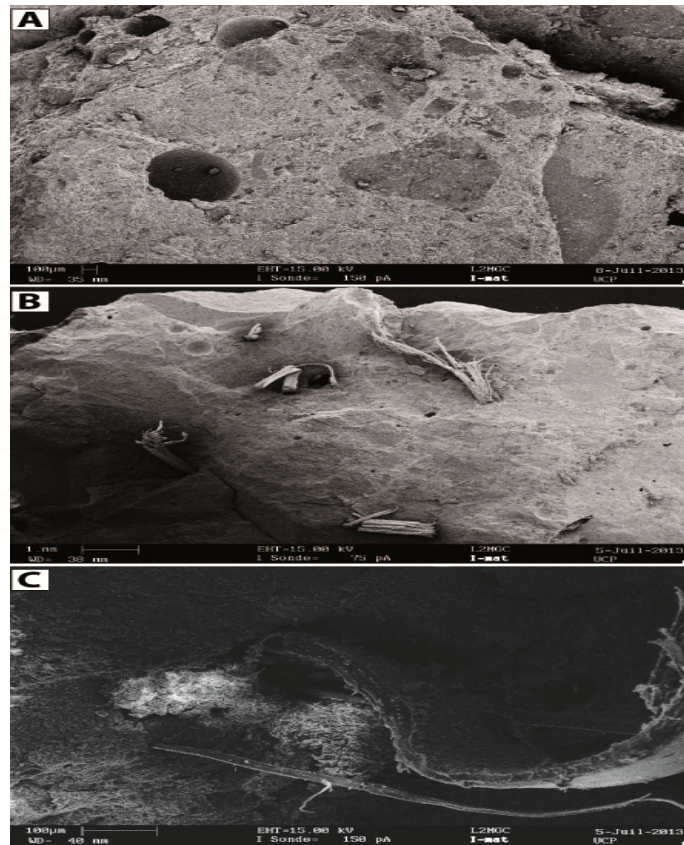


Figure III.13 Etude microscopiques de quelques échantillons (OC, PC et AC)

L'étude microscopique nous permet de voir la relation entre la matrice et les fibres.

On constate qu'il y a un mince vide autour de toutes fibres mais le vide autour de l'alfa étant encore plus mince que le vide existant autour du polypropylène. Cela suggère une meilleure adhérence au béton dans le cas de l'alfa en raison de sa rugosité. En plus, la composition chimique de l'alfa et celle du polypropylène sont très différentes, principalement des oxydes pour l'alfa,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ , et que Cet H pour le polypropylène, ce qui favorise l'adhérence entre et la pate de ciment.

### III.3 Effet du rapport E/C sur le comportement physico-mécanique du béton renforcé de fibres végétales

L'objectif de cette partie porte sur l'étude de l'influence de rapport (E/C) sur les caractéristiques mécaniques et physiques des bétons optimaux renforcés des fibres d'alfa (AC-1) et des fibres de chanvre (HC-0.25), à l'état frais ainsi qu'à l'état durci. Ces propriétés seront comparées à celles des bétons témoins, PC et OC. Pour cela trois rapports E/C ont été étudiés ; 0.4 ,0.5 et 0.6.

#### III.3.1 A l'état frais

##### III.3.1.1 L'essai d'affaissement

Les résultats de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams des quatre bétons confectionnés selon la norme NF P 18 – 451 avec les trois rapports E/C sont représentés sur la figure III.14 :

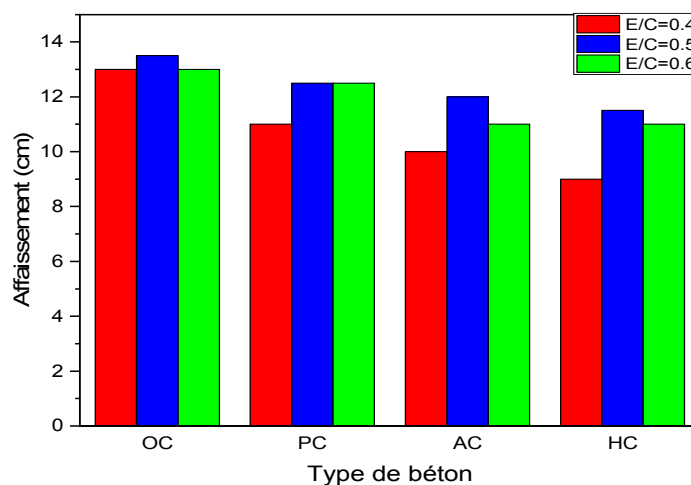


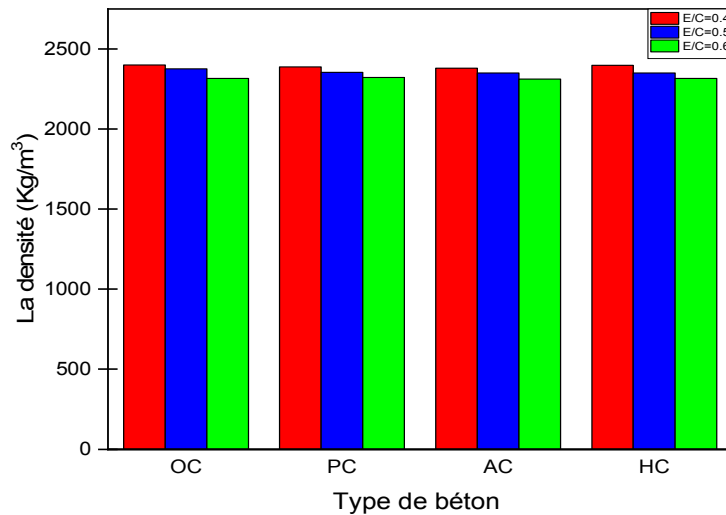
Figure III.14 Affaissement des bétons confectionnés en fonction du rapport E/C

D'après les résultats obtenus, le rapport Eau/Ciment affecte significativement l'affaissement au cône d'Abrams, particulièrement dans le cas des bétons renforcés des fibres végétales qui possèdent une porosité élevée et absorbe une quantité d'eau de gâchage, ce qui nécessite l'ajout de super plastifiant de 0.6% pour E/C= 0.5 et 1% pour E/C=0.4 de volume de ciment afin de maintenir une ouvrabilité classe S2 ou S3 de nos béton, et faciliter leur mise en place. Notons que les bétons à de rapport E/C=0.6 ne nécessitent pas de super plastifiant.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### III.3.1.2 La masse volumique

Les différentes masses volumiques des bétons confectionnée en fonction de la variation du rapport E/C sont représentent sur la figure III.15:



**Figure III.15** Densité à l'état frais des bétons confectionnés en fonction d'E/C.

On constate que le rapport E /C affect la densité à l'état frais du béton. La diminution du rapport E/C de 0.6 à 0.4 avec l'ajout d'un superplastifiant, entraine plus de compacité du béton ce qui lui confère une densité plus.

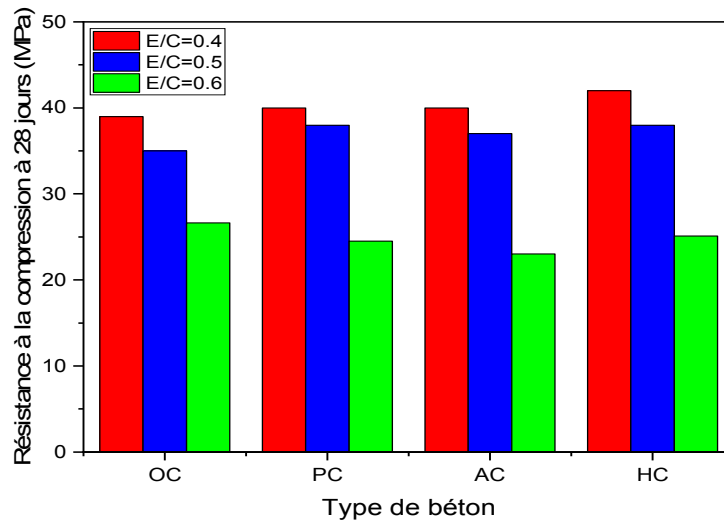
### III.3.2 A l'état durci

#### III.3.2.1 Les propriétés mécaniques

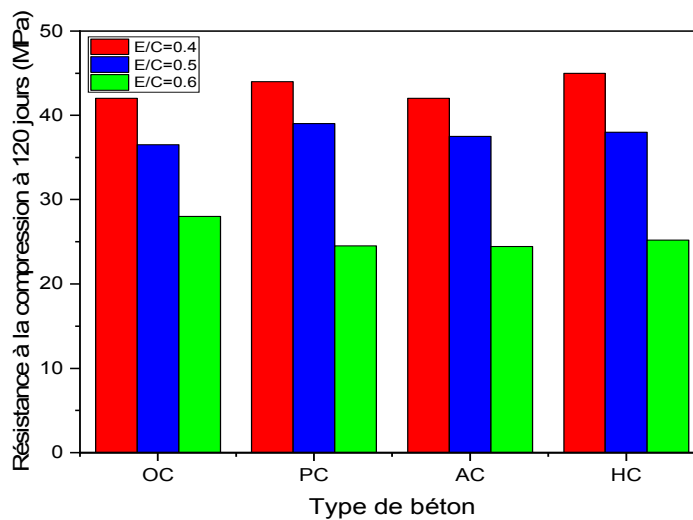
##### III.3.2.1.1 Résistance à la compression

Les figures III.16 et III.17 représentent des résistances à la compression simple en fonction du rapport E/C à 28 et 120 jours :

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure III.16** Résistance à la traction à 28 jours en fonction du rapport E/C



**Figure III.17** Résistance à la compression à 120 jours en fonction du rapport E/C.

D'après les résultats des figures ci-dessus, on constate une augmentation de la résistance à la compression avec la diminution de rapport E/C dans tous les bétons y compris les bétons fibrés. Pour le béton renforcé des fibres d'alfa, la résistance à la compression est 20.46, 29.07 et 30.56 MPa respectivement pour les rapports E/C ; 0.4, 0.5 et 0.6 à 120 jours. Le HC représente la meilleure résistance des deux bétons fibré suivi par PC. Le AC, étant le moins résistant, mais sa résistance dépasse celle d'un béton de classe 25/30.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Les résistances de tous les bétons sont dans la plage d'un béton de structure, à l'exception des bétons dont le rapport E/C= 0.6.

Ce comportement pourrait être expliqué par une porosité moins importante pour les bétons dont le rapport E/C est de 0.4 et 0.5.

### III.3.2.1.2 Résistance à la traction par flexion :

Les résultats obtenus pour les résistances à la traction par flexion des bétons étudiés en fonction du rapport E/C à 28 et à 120 jours sont présentés sur les figures III.18 et III.19:

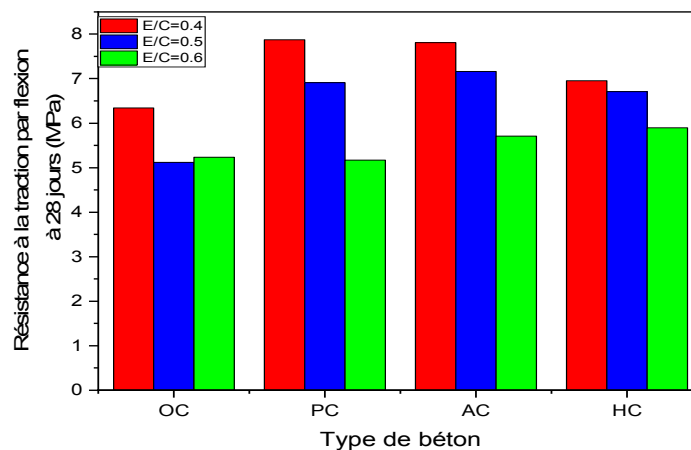


Figure III.18 Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 28 jours

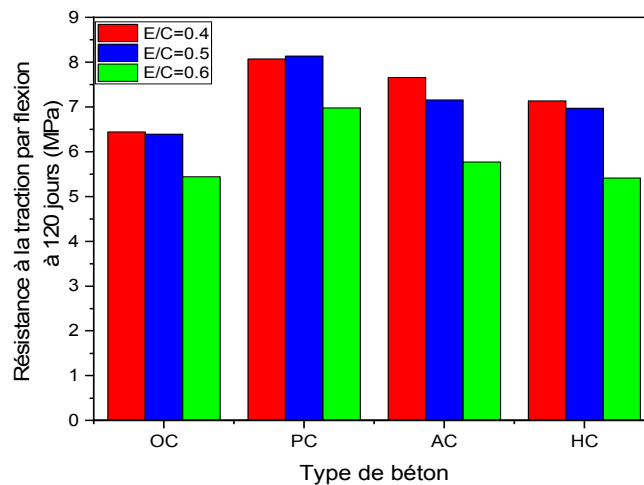


Figure III.19 Résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 120 jours

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Les résultats obtenus pour tous les bétons, notamment les bétons fibrés à 28 jours et à 120 jours montrent que le rapport E/C est inversement proportionnel à la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression simple.

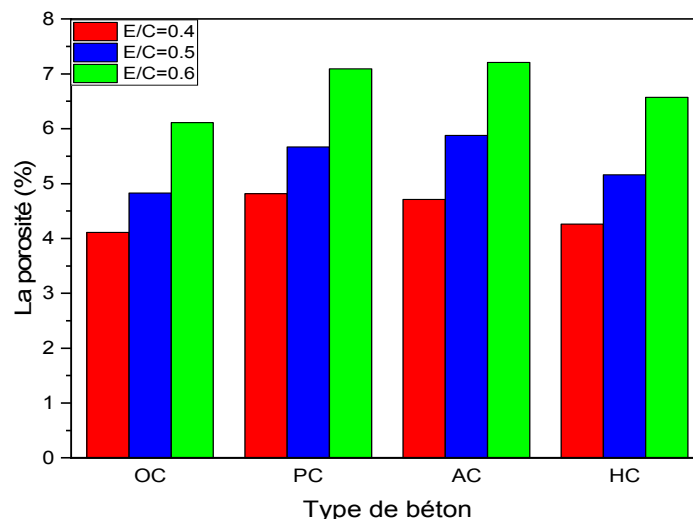
Si le rapport E/C diminue, la résistance à la traction par flexion augmente. A titre d'exemple, dans le cas des bétons renforcés des fibres de chanvre, on remarque que plus E/C diminue, plus la résistance à la traction par flexion augmente ; pour des rapports E/C égaux 0.6, 0.5, 0.4, nous avons respectivement 5.41 MPa, 6.97MPa et 7.14 MPa comme résistance à la traction par flexion.

La diminution du rapport E/C entraîne une réduction de l'eau libre dans les composites, après départ de cette eau, la création des pores est atténuée et par conséquent le matériau devient dense et résistant.

### III.3.2.2 Les propriétés physiques :

#### III.3.2.2.1 La porosité :

La figure III.20 représente la porosité des différents bétons en fonction du rapport E/C après un temps de cure de 28 jours :



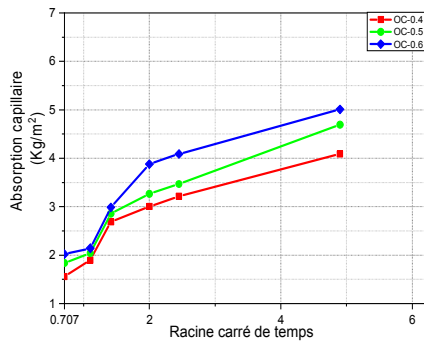
**Figure III.20** Porosité des bétons étudiés à 28 jours de cure en fonction E/C

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

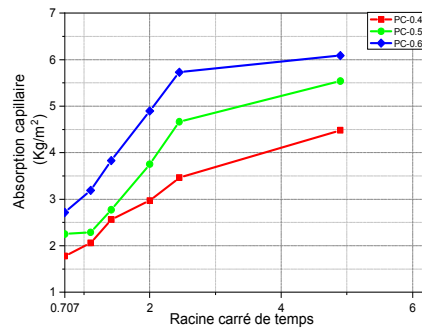
Les résultats obtenus montrent que le rapport E/C est un paramètre très important pour la porosité des bétons. Il y'a une proportionnalité entre la porosité des bétons, notamment des bétons fibrés et le rapport E/C. La porosité diminue avec la diminution du rapport E/C. La densification des bétons conduit systématiquement à la réduction de la porosité, et se traduit par une amélioration des résistances.

*III.3.2.2 Absorption capillaire*

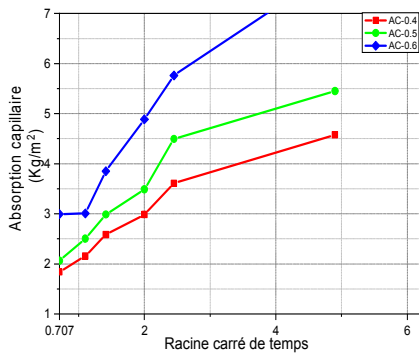
Les résultats du coefficient d'absorption capillaire des bétons fibrés en fonction de trois rapports E/C sont présentés sur la figure III.21 :



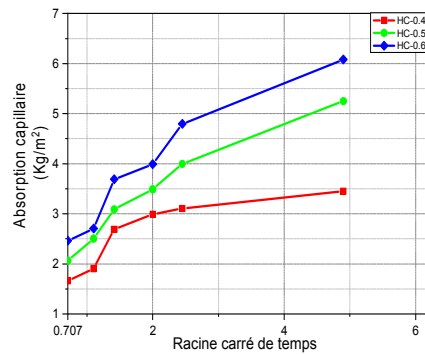
**Béton ordinaire (OC)**



**Béton de polypropylène(PC)**



**Béton d'alfa(AC)**



**Béton de chanvre (HC)**

**Figure III.21** Absorption capillaire des bétons étudiés en fonction du rapport E/C

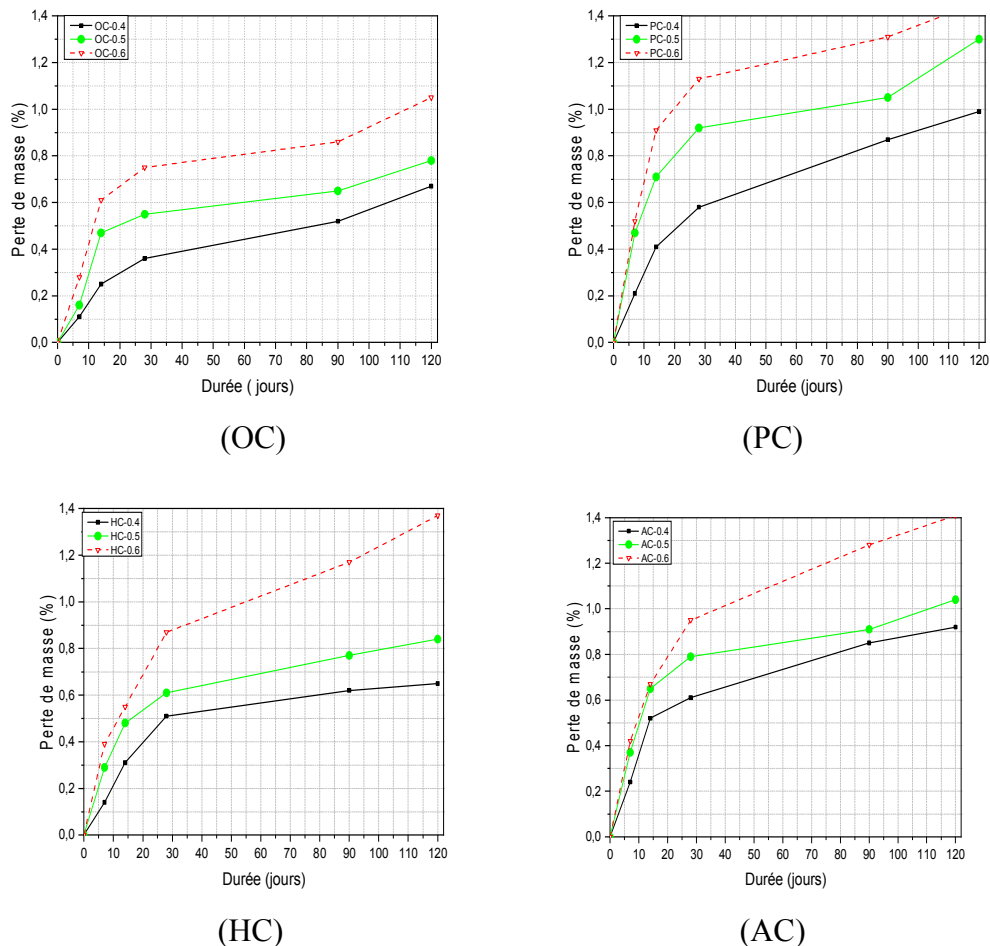
D'après les résultats obtenus, on remarque que l'absorption est plus importante pour le rapport E/C=0.6, à cause de la densification des matériaux dans le cas des faibles rapports E/C qui conduit à la réduction de la porosité et l'absorption capillaire et ce qui nous donne un béton résistant et durable.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

De part sa porosité, le béton à E/C = 0.6 est surement le béton le moins résistant aux agressions chimiques.

### III.3.2.2.3 La perte de masse :

Les résultats de la perte de masse des différents bétons étudiés en fonction de rapport E/C sont représentés sur la figure III.22 :



**Figure III.22** Evolution de la masse totale des bétons étudiés en fonction de E/C.

Les résultats indiquent que la diminution du rapport E/C entraîne moins de perte de masse à cause de leur porosité moins importante.

La porosité des composites fibrés dont le rapport E/C est de 0.6, contribue à l'accélération de la diffusion de l'eau et par conséquent entraîne une perte de masse plus élevée, surtout dans le cas de fibres de polypropylène qui ne retiennent pas l'eau.



### **III.4 Conclusion**

A la fin de ce chapitre nous pouvons faire les conclusions suivantes :

1 - Le taux de fibres naturelles affecte négativement la maniabilité du béton, plus le taux de fibres est élevé, plus la maniabilité du béton est compromise.

2- les fibres végétales absorbent l'eau de gâchage et entraînent un mauvais compactage, affectant la densité du béton à l'état frais. Les pores augmentent et créent ainsi des canaux conducteurs d'eau, ce qui augmente l'absorption d'eau dans le béton.

2 - Les fibres de végétales que ce soit l'alfa ou le chanvre n'améliorent pas la résistance à la compression simple du béton, qui diminue quand leur apport dépasse les 0.25% pour le chanvre et les 1% pour l'alfa, à cause de la dispersion hétérogène des fibres qui se présentent sous forme de pelotes.

3 - Les fibres de chanvre et d'alfa améliorent la résistance à la traction par flexion du béton, qui dépasse ainsi celle du béton ordinaire et avoisine celle du béton renforcé de fibres de polypropylène. Cette propriété pourrait contribuer à empêcher la propagation rapide de fissures dans le béton et la ruine soudaine des constructions. Elles retardent les fissurations, surtout au jeune âge et amortissent l'éclatement du béton fibré comparé au béton ordinaire et comme c'est le cas des bétons renforcé de fibres de polypropylène.

4- Les fibres végétales réduisent considérablement la compacité granulaire dans le béton, à cause de leur mauvaise dispersion. Elles forment des pelotes empêchent l'hydratation et l'homogénéisation du mélange. Elles contribuent à augmenter légèrement sa porosité totale à l'eau, qui pourrait diminuer la résistance à la compression du béton.

5- Le module élastique dynamique varie en fonction de la quantité de fibres incorporée dans le béton. Plus le pourcentage de fibres augmente, plus le module d'élasticité diminue.

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

6- l'incorporation des fibres végétales utilisées augmente l'absorption capillaire et la cinétique d'absorption du béton, ce comportement devient significative lorsque le taux de fibres augmente, ce qui le rend vulnérable et sensible aux dommages et devient moins durable, quand il est exposé à un environnement agressif.

7- les fibres végétales que ce soit d'alfa et de chanvre contribue à augmenter la perte de masse tout comme les fibres de polypropylène mais leurs effet dépend des caractéristiques des fibres comme le dosage, la porosité et le diamètre.

8- L'utilisation des fibres végétales non traitées pour le renforcement des bétons est meilleure que celle des fibres de polypropylène à différents de points de vue, notamment, l'aspect économique et environnemental. Ces fibres naturelles non traitées sont bon marché et ne nuisent pas à l'écosystème comparées aux fibres polypropylène qui sont dérivées du pétrole.

9 – Le rapport E/C est un paramètre essentiel dont la caractérisation des bétons, s'il diminue, le béton devient plus dense et moins poreux, ce qui se traduit par une réduction d'absorption capillaire et la cinétique d'absorption. Le béton obtenu est résistant et durable.

10–Les bétons renforcés de fibres végétales optimaux obtenus après notre étude expérimentale, sont le AC-1 à 1% de taux de fibre d'alfa et le HC-0.25 à 0.25% pour la substitution des fibres de polypropylène et la confection de composites résistants, durables et respectueux de l'environnement, dits « béton vert » ou « eco-friendly green concrete».

### **III.5 Références bibliographiques**

[1] Page J., Khadraoui F., Boutouil M., Gomina M., *Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers*, Construction and Building Materials , Vol 140 , pp.344–353, 2017.

[2] Khelifa M.R., Leklou N., Bellal T., Hebert R.L., Ledesert A.B., *Is Alfa a vegetal fibre suitable for making green reinforced concrete?* European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 22, pp.1–21, 2016.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [3] Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M.M., Chabannet M., *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*, Cement Concrete and Composite, Vol 27, pp.554–564, 2005.
- [4] Bentur A., *Fibre reinforced cementitious composites*, 2nd Edition, Taylor & Francis, London; New York, 2007.
- [5] Aziz M. A., Paramasivam P., Lee, S.L., *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*, Int. J. Cement and Composite Lightweight Concrete, Vol 3, pp.123–132, 1981.
- [6] Okeola A., Abuodha S.O., Mweru J., *Experimental investigation of the physical and mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete*, Fibers, Vol 6, pp.00-53, 2018.
- [7] Çomak B, Bideci A., Bideci Ö., *Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar*, Construction and Building Materials, Vol 169, pp.794–799, 2018.
- [8] Jun Z, Guang-hui L, Ying Z. *Study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced fine aggregate concrete under action of freeze–thaw*. Concrete 2010.
- [9] Ramaswamy H.S., Ahuja B., Krishnamoorthy M., *Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol 5, pp.3–13, 1983.
- [10] Sedan D, Pagnoux C, Smith A, et al. *Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fiber/matrix interaction*. J Eur Ceram Soc, Vol 28, pp. 183–192, 2008.
- [11] Chafei S., Khadraoui F., Boutouil M., Gomina M., *Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites*, Construction Building Materials, Vol 54, pp. 659–664, 2014.
- [12] Savastano H., Warden P.G., Coutts R.S.P., *Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites*, Cement . Concrete and Composites, Vol 27, pp. 583–592, 2005.
- [13] Agopyan V., Savastano H., John V.M., Cincotto M.A., *Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview*, Cement. Concrete and Composite, Vol 27, pp.527–536, 2005.
- [14] Söylev T.A., Özturan T., *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*. Construction and Building Materials, Vol 73, pp. 67–75, 2014.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [15] Ali M., Liu A., SouH., Chouw N., *Mechanical and dynamic properties of coconut fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials, Vol 30 , pp.814–825, 2012.
- [16] Babu S., GaneshD., Babu K., Wee T.H., *Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete*. Cement and Concrete Composites, Vol 28, pp. 520–527, 2006.
- [17] Yahiaoui L., *Characterization of to rupture of composite based with vegetable fibers (Diss)*, Magister Thesis in Mechanical Engineering , University Ferhat Abbas Setif , 2011.
- [18] Magniont C., *Contribution to the formulation and characterization of an eco-building material based on agricultural resources* , PhD Thesis in Civil Engineering, Toulouse: Toulouse University, 2010.
- [19] Savastano H., Agopyan V., Nolasco AM., *Plant fibre reinforced cement components for roofing*. Construction BuildingMaterials, Vol 13, pp.433–438, 1999.
- [20] Xie X., Zhou Z., Jiang M., *Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties*. Composite Part B: Engineering, Vol78, pp.153–161, 2015.
- [21] Shoukry H., Kotkata MF., EL-Enein SA., *Thermo-physical properties of nano-structured lightweight fiber reinforced cementitious composites*. Construction BuildingMaterials, Vol 102, pp.167–174, 2016.
- [22] Nozahic V., Ameziane S., *Effect of different treatments on the interface between the lignocellulosic particles and an inorganic binder*. The 29th Meeting of the AUGC. Tlemcen, Algeria, p. 236–246, 2011.
- [23] Achour A., Ghomari F., Belayachi N., *Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers*, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol 31, 1938–1962, 2017.

## **Chapitre IV. Etude de la durabilité des bétons renforcés de fibres face aux attaques sulfatiques externes**

## **IV. Etude de la durabilité des bétons renforcés de fibres face aux attaques sulfatiques externes**

### **IV.1 Introduction**

La durabilité du béton est devenue un enjeu majeur de l'ingénierie des structures en béton au cours des dernières décennies, elle est fonction de sa capacité à résister aux dégradations mécaniques, hydriques, physiques et chimiques qu'il subit.

Ces structures sont régulièrement soumises à des conditions environnementales agressives dues à une variété de produits chimiques naturels et industriels existant dans notre environnement. L'une des formes les plus répandues et les plus courantes d'attaques chimiques est l'action des sulfates sur les éléments en béton.

L'attaque sulfatique externe (ASE) est une réaction chimique entre des ions de sulfates provenant d'un environnement externe et les produits d'hydratation, formant des produits expansifs qui provoquent des endommagements sur le béton [1-3].

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la durabilité des bétons renforcés de fibres végétales non traités à savoir les fibres d'alfa et de chanvre face aux attaques sulfatiques externe et les comparer à celle de fibres de polypropylène.

Pour simuler l'ASE, nous avons utilisé deux protocoles de vieillissement : le premier est l'immersion totale dans une solution sulfatée et le second est l'immersion/séchage à 60°C dans deux solutions salines identiques, l'une aux sulfates de sodium et l'autre aux sulfates de magnésium. Le deuxième protocole est un protocole de vieillissement accéléré.

### **IV.2 Matériaux et matériels utilisés**

Nous avons testé trois types bétons fibrés (chanvre, alfa et polypropylène) et un béton ordinaire.

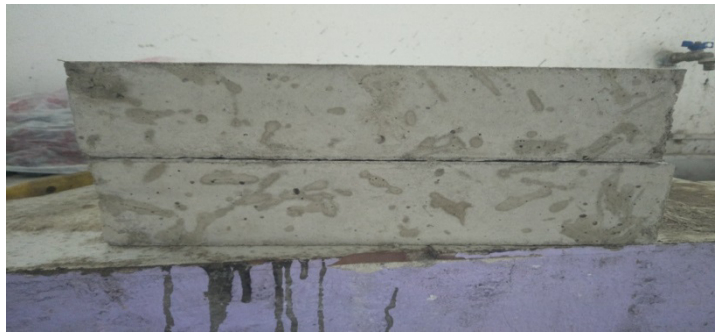
Des bétons renforcés de fibres d'alfa (AC), de fibres de chanvre(HC), de fibres de polypropylène (PC) et sans fibres (OC).

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Nous avons confectionnés les différents composites avec les mêmes matériaux de mentionné dans le chapitre II.

Nous avons utilisé deux rapports E/C ; 0,40 et 0,50 afin d'étudier l'effet des différents paramètres de formulation sur la durabilité des bétons fibrés faces aux attaques sulfatiques externes.

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont de dimensions 7x7x28 cm (Figure IV.1) sciées en éprouvettes cubiques 7x7x7 cm (Figure IV.2).



**Figure IV.1** Echantillon de béton de dimension 7x7x28 cm



**Figure IV.2** Cubes de 7x7x7 cm découpés à partir des éprouvettes 7x7x28 cm

Deux solutions salines ont été utilisées, le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et le sulfate de magnésium ( $\text{Mg}_2\text{SO}_4$ ) comme le montre la figure IV.3.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



a) sulfate de sodium

b) sulfate de magnésium

**Figure IV.3** Les sulfates utilisés.

Nous avons également utilisé une balance pour mesurer la masse des échantillons et une étuve réglée à 60°C pour l'essai d'immersion-séchage (Figures IV.4 et IV.5) :



**Figure IV.3** Balance



**Figure IV.4** Etuve

### IV.3 Méthode expérimentale

Pour étudier l'effet de l'attaque sulfatique externe sur les différents échantillons, nous avons utilisé deux protocoles qui favorisent le développement de cette pathologie.

- **Protocole 1** : En immersion complète dans une solution saline à 20°C.
- **Protocole 2** : Par cycles immersion / séchage à 60°C dans deux solutions salines.



#### **IV.2.1 Immersion complète**

C'est le protocole (Figure IV.6) le plus fréquemment utilisé dans la littérature pour simuler une attaque sulfatée du béton dans les sols salins tels que les sols gypseux [4].

Les échantillons cubiques 7x7x7cm sont complètement immergés dans une solution saline de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à 12,5% en poids dans une salle à température constante (20°C), renouvelée tous les 30 jours.

Pour voir l'évolution du comportement des échantillons soumis à une attaque sulfatique externe au cours du le temps, nous avons relevé les pertes de masse à différents intervalles de temps sur une période de 365 jours.

La résistance à la compression des différents bétons a été calculée après 28 jours de cure normale, c'est-à-dire à 0 jours d'immersion et après 45 jours, 90 jours, 365 jours d'immersion totale.

Les bétons étudiés dans ce chapitre sont les bétons optimaux obtenus dans le chapitre précédents, qui répondent aux caractéristiques d'un béton de structure de classe 25/30 ; le béton renforcé de 1% de fibres d'alfa AC-1 et le béton renforcé de 0.25% de fibres de chanvre HC-0.25. Les bétons témoins ont également été maintenus dans cette étude : le béton renforcé de fibres de polypropylène PC et le ordinaire OC.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



**Figure IV.5** Immersion des échantillons du bétons dans la solution saline

Le nombre d'échantillons étudiés en immersion complète par type de béton est donné dans le tableau IV. 1 :

**Tableau IV.1** Nombre d'échantillons utilisés pour l'immersion complète

Type de béton	Nombre d'échantillons 7x7x7 cm
OC	12
PC	12
AC-1	12
HC-0.25	12

### IV.2.2 Cycles d'immersion/séchage à 60 °C

Il s'agit d'un protocole accélérer pour le vieillissement du béton basé sur des cycles d'immersion de 24 heures [5,6]. Il est défini comme suit :

- Immersion des échantillons pendant 4 heures dans une solution saline.
- Séchage des échantillons dans une étuve à 60° pendant 20 heures. Cette température a été choisie (inférieure à 65°C) pour éviter la superposition avec l'attaque sulfatique interne due à la formation retardée d'ettringite [7-9].

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

La masse de chaque échantillon est mesurée quotidiennement, après la phase de séchage. Les échantillons sont testés à la compression simple après 28 jours de maturation c'est dire 0 jours d'exposition aux sulfates, ainsi qu'à 5, 15 et 45 et 60 cycles pour suivre l'évolution de leurs performances mécaniques.

L'étude est complétée par une analyse au microscope électronique à balayage (MEB) pour mieux observer la microstructure des échantillons de béton et mieux comprendre le phénomène d'altération sous l'effet des sulfates par immersion/séchage à 60 °C.

Dans ce protocole nous avons utilisé deux solutions chimiques dosées à 12,5%, la première avec du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et la seconde avec du  $\text{Mg}_2\text{SO}_4$  afin de comparer les résultats des deux expériences. La valeur élevée de la teneur en sulfates a pour but d'accélérer le plus possible l'effet de l'attaque sulfatique externe.

Le nombre d'échantillons étudiés en immersion/séchage à 60°C est donné par le tableau IV.2 :

**Tableau IV.2** Nombre d'échantillons utilisé dans l'immersion/séchage à 60°C

<b>Type de béton</b>	<b>Nombre d'éprouvettes 7x7x7 cm</b>
<b>OC</b>	12
<b>AC-1</b>	12
<b>PC</b>	12
<b>HC-0.25</b>	12

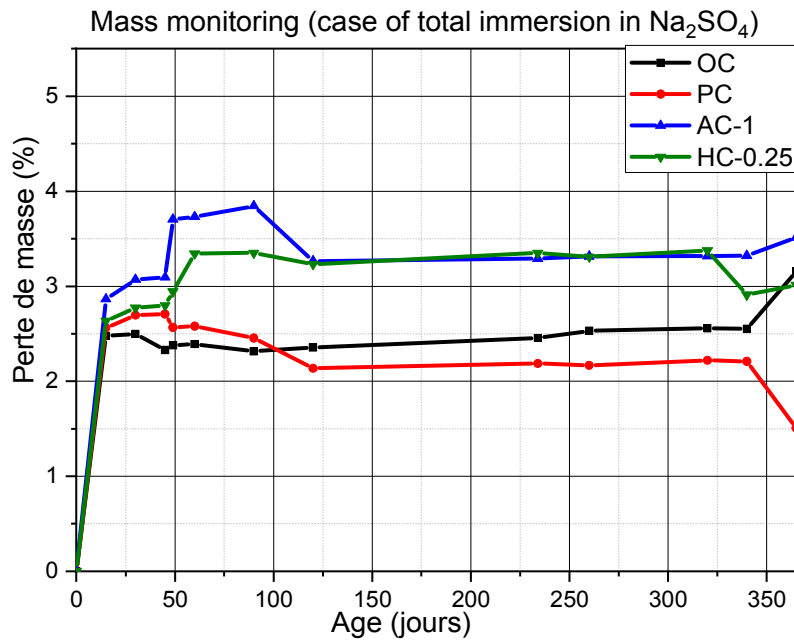
### **IV.3 Résultats et discussion**

#### **IV.3.1 Immersion totale**

##### **IV.3.1.1 Perte de masse**

La figure IV.6 représente l'évolution de la masse des différents bétons confectionnés.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**



**Figure IV.6** Suivi de masse des bétons confectionnés.

Les résultats montrent que tous les bétons ont un gain de masse qui varie entre 0 et 3% du début jusqu'à la fin du protocole. Ils évoluent tous de la même manière face à l'attaque sulfatique externe. Un regain de masse important pendant les premiers cycles puis une stabilisation relative de la masse avant une éventuelle ruine de l'échantillon.

Le AC-1 et le HC-0.25 ont un comportement similaire de par la nature des fibres, mais leur perte de masse suit la même évolution de celle du PC et de l'OC qui sont très proches entre eux.

Le léger gain de masse des composites renforcés de fibres végétales comparés au béton renforcé de fibres de polypropylène est du à la porosité de leurs matrices cimentaires ainsi qu'à la porosité des fibres naturelles.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### IV.3.1.2 Résistance à la compression

Pour évaluer la résistance à la compression, les échantillons des différents bétons sont testés à la compression simple à différentes périodes de leur exposition aux sulfates en utilisant la presse du laboratoire de génie civil (Figure IV.7).

Trois échantillons cubiques 7x7x7 cm ont été testés par béton pour chaque échéance, nos résultats correspondent à la moyenne des trois valeurs obtenus.



**Figure IV.7** Essais de compression simple des échantillons 7x7x7 cm

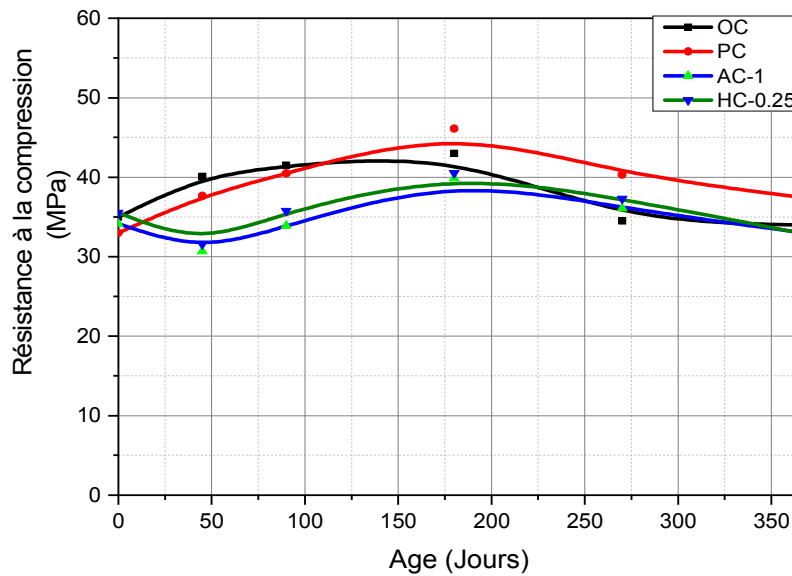
La figure IV.8 représente l'évolution de la résistance à la compression simple de différents bétons confectionnés.

On constate que la résistance à la compression du PC et du OC constituent une évolution dans le premier palier de 0 à 45 jours alors qu'il diminue pour les deux types de bétons à base de fibres végétales.

Dans le deuxième palier de 45 et 90 jours la tendance est légèrement inversée pour AC-1 et HC-0.25 et le OC et PC continuent d'augmenter légèrement.

L'augmentation de la résistance est due à l'hydratation continue des produits anhydres de ciment et à la réaction du sulfate avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pour former le gypse et l'ettringite, qui occupent les micropores menant à une structure plus dense, ce qui influe positivement sur les résistances mécaniques des composites [10,11].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



**Figure IV.8** Essais de compression simple des échantillons 7x7x7 cm

A la fin de ce protocole, tous les bétons présentent une légère diminution de leurs résistances par rapport aux résistances initiales à 0 jour d'immersion totale.

Les résistances des bétons AC-1 et HC-0.25 restent toujours dans la fourchette des résistances des bétons de structure.

### IV.3.1.3 Observation macroscopique

Après une année d'immersion complète, les échantillons ne présentent aucun signe de gonflement ou de fissuration visible à l'œil nu (figure IV.9), ce qui suggère l'absence d'une attaque sulfatique externe significative après deux mois d'immersion complète dans la solution saline. Ces résultats sont cohérents avec les travaux antérieurs [6,12].

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



Figure IV.9 Photographies d'échantillons à l'immersion totale.

### IV.3.2 Immersion/séchage à 60°C

#### IV.3.2.1 Suivi de masse

La figure IV.10 montre l'évolution de la surveillance de la masse pour tous les bétons étudiés durant les 60 cycles de ce protocole.

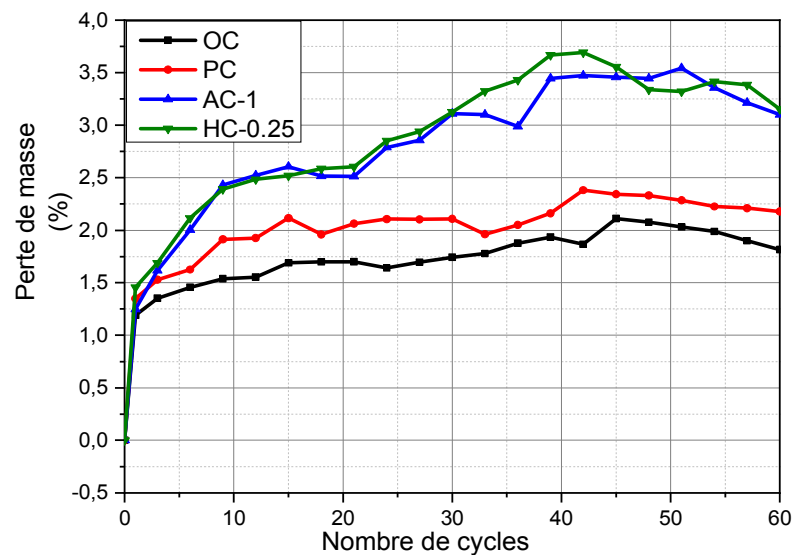


Figure IV.10 Suivi de masse des bétons étudiés pendant 60 cycles d'immersion/séchage

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

On constate une évolution de gain de masse de différents bétons pour 0 à 15 cycles, plus particulièrement celle des bétons renforcés des fibres d'alfa et de chanvre. Ce gain est attribué à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et plus particulièrement entre la portlandite et les sulfates de sodium [7, 13].

Le OC et PC stabilise entre le 15<sup>ème</sup> à 45<sup>ème</sup> cycles d'immersion mais le AC-1 et HC-0.25 continuent à suivre une évolution de gain de masse plus marqué, de part leur porosité élevée.

A partir du 15<sup>ème</sup> cycle, une perte de masse est constatée suite au détachement des plusieurs morceau de béton particulièrement sur les arrêtes et d'une desquamation prononcée sur plusieurs surface de tous les bétons avant une éventuelle ruine prématurée.

Les bétons HC-0.25 et AC-1 ont un comportement similaire du début à la fin du protocole. Ils enregistrent la plus forte augmentation de masse, qui est d'environ de 3 % due à leur porosité importante.

### IV.3.2.2 La résistance à la compression

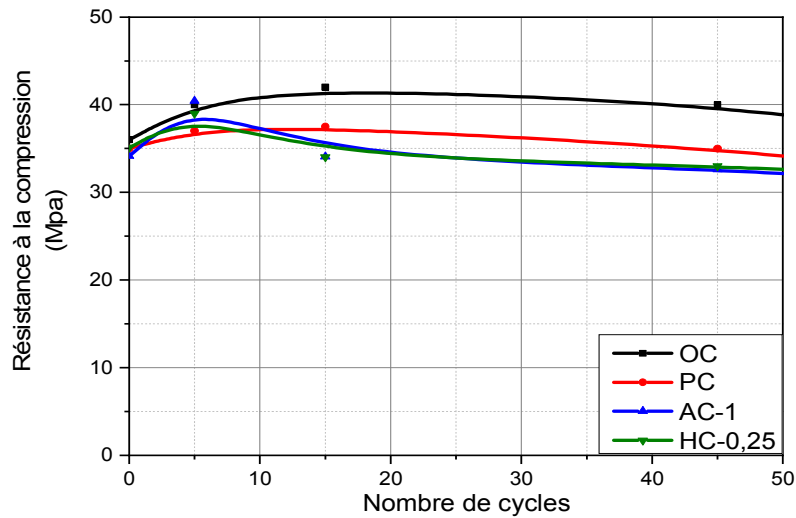
La figure IV.11 représente la variation de la résistance à la compression des différents bétons confectionnés en fonction des cycles d'immersion/séchage à 60°C. Dans cette partie, la solution d'immersion est dosée à 12.5% de sulfate de sodium à 0.

On remarque que la résistance à la compression augmente de 0 à 5 cycles pour tous les bétons, c'est l'effet de la cristallisation de sels dans les pores du béton [7].

Une légère baisse de la résistance à la compression entre 5 à 15 cycles à été observée pour les AC-1 et HC-0.25 contrairement pour le OC et PC.



## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques



**Figure IV.11** Résistance à la compression des bétons étudiés pendant 60 cycles d'immersion/séchage.

Au-delà du 15<sup>ème</sup> cycles les résistances de tous les bétons diminuent légèrement et ce, jusqu'à la fin du protocole. Ces échantillons restent dans la plage de béton de structure de classe 25/30.

Malgré l'écaillage de la surface des échantillons, leurs noyaux de béton sont restés intacts, ce qui montre que l'attaque sulfatique n'a pas eu d'effet significatif sur les propriétés mécaniques des différents bétons après 60 cycles de protocole dans une solution de sulfates de sodium.

Le PC présente des résistances mécaniques meilleures que celles de l'AC-1 et du HC-0.25, ce qui est due probablement au comportement des fibres de polypropylène dans la solution saline. Ces fibres ne se dégradent pas rapidement face aux ions de sulfates contrairement aux fibres végétales.

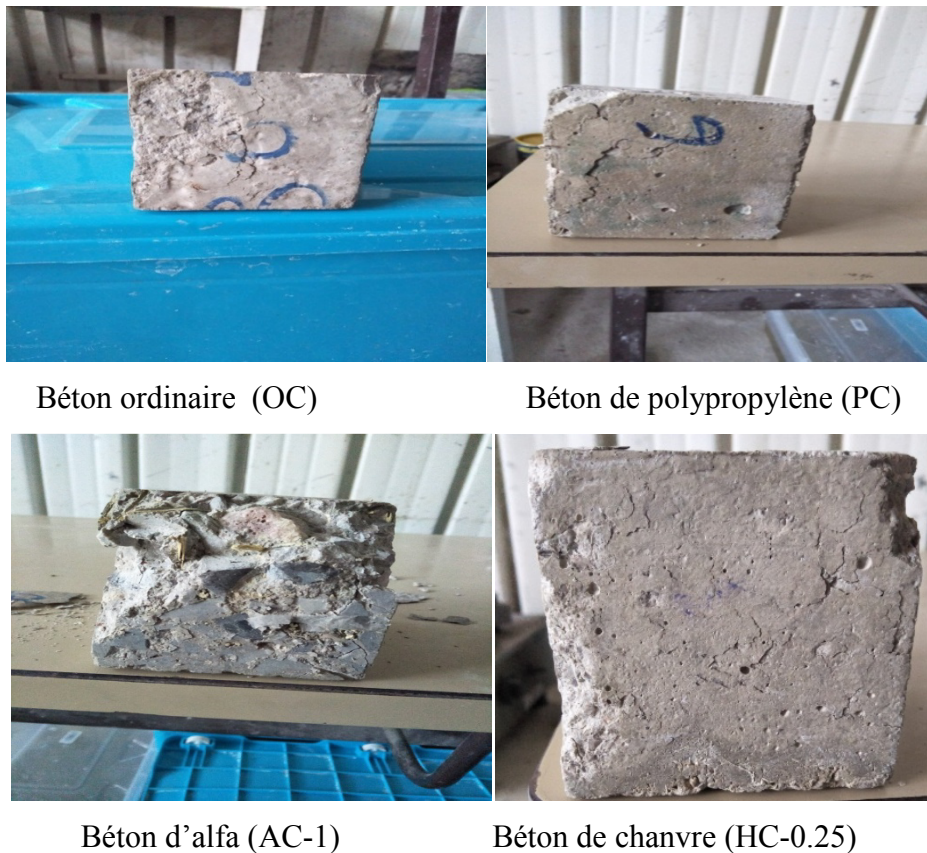
### IV.3.2.3 Suivi macroscopique des différents échantillons

Les principaux symptômes macroscopiques de l'attaque sulfatique externe sont les suivants : gonflement, prise de masse et fissuration affectant les performances mécaniques des composites.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Pendant la durée de déroulement de ce protocole, des photos ont été prises régulièrement avant et après l'immersion, fournissant ainsi des informations visuelles sur l'évolution macroscopique des échantillons ainsi que sur l'apparition d'éventuels dommages.

La figure IV.12 présente les photographies des bétons étudiés à la fin de 60 cycles de protocole.



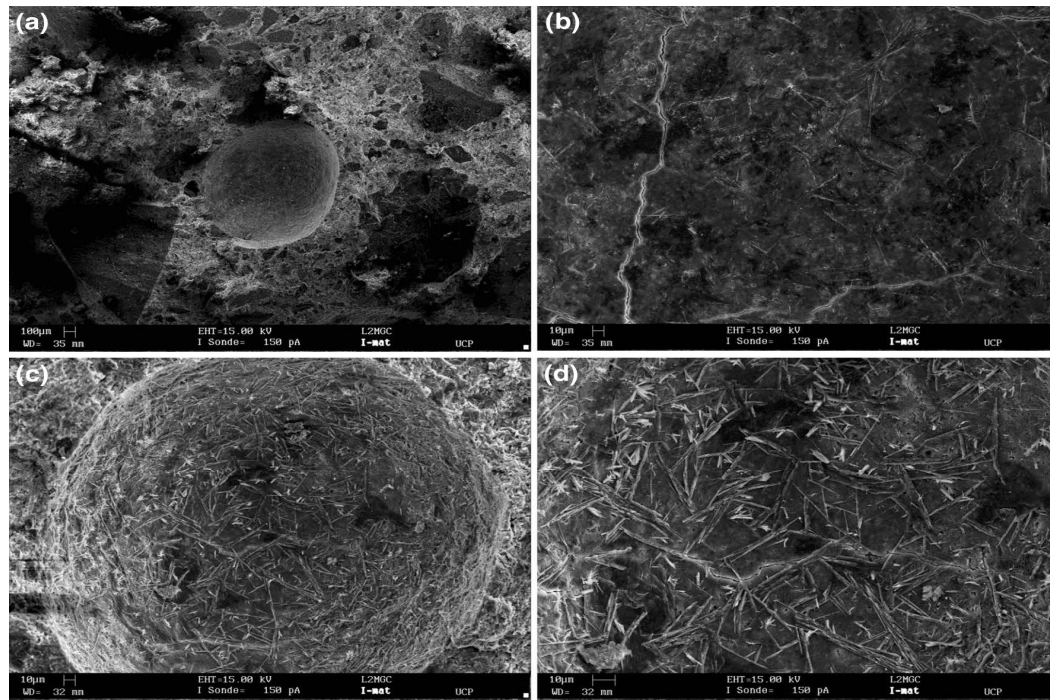
**Figure IV.12** Suivi macroscopique à la fin du protocole immersion/séchage( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )

L'observation macroscopique montre des dégradations significatives dans les bétons renforcés de fibres végétales comparées à celles du béton renforcé de fibres de polypropylène. Ces dégradations sont dues aux caractéristiques poreuses de fibres naturelles qui rendent le composite plus poreux, absorbant ainsi plus de sulfates, qui entraîne sa dégradation, voir sa ruine totale.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

### IV.3.2.4 Étude microscopique

La microstructure a été effectuée sur échantillons d'OC, PC et AC. Pour le OC, à 0 cycle, les figures (IV.13a et IV.13b) ne montrent pas de formation d'ettringite dans les bétons, ce qui suggère l'absence d'ettringite secondaire dans ces bétons avant le début du protocole. Au 15 cycle, des aiguilles d'ettringite ont été observées dans de nombreuses vacuoles (Figure IV.13c et IV.13d) mais pas dans la partie pâte /granulat ce qui induit qu'il y a eu d'attaque sulfatique externe.

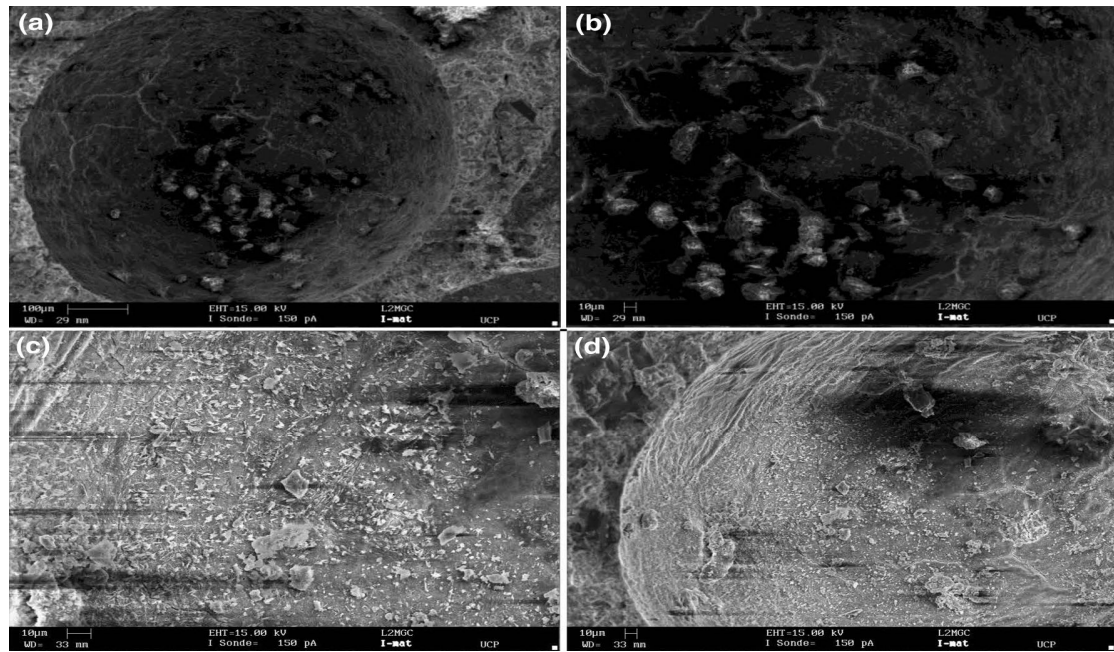


**Figure IV.13** Etude microscopique de béton ordinaire pendant le protocole immersion/séchage à 60°C : (a) vacuole de OC (0 cycle) ; (b) surface de OC (0 cycle) ; (c) formation de nombreuses aiguilles sur la surface de OC (15 cycles) ; (d) zoom sur la vacuole de OC (15 cycles) [4]

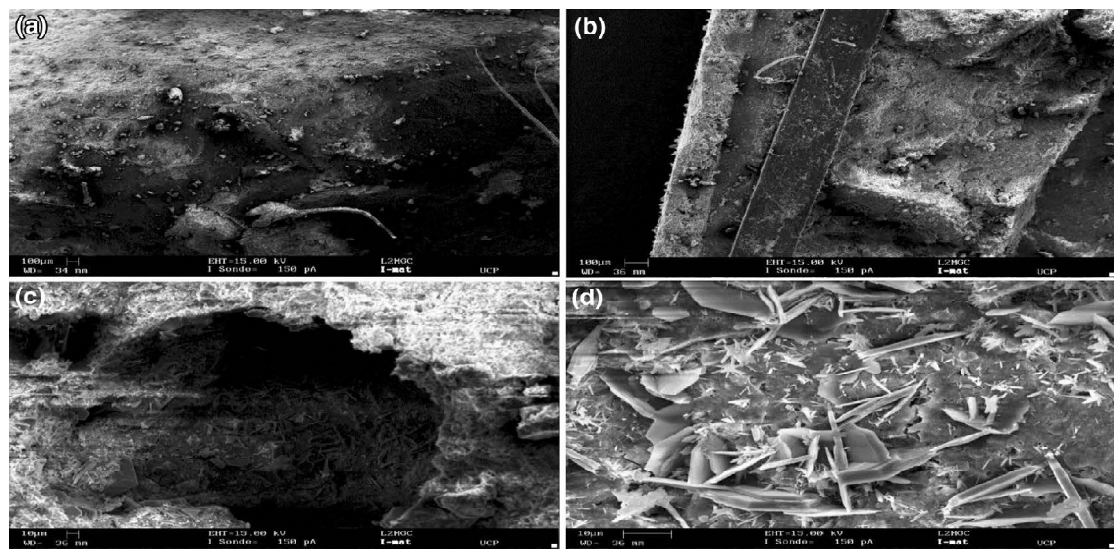
Pour le cas du AC-1 on remarque l'absence de d'ettringite secondaire dans les vacuoles à 0 cycle (figure IV14a et IV14b), et une présence de pelotes d'ettringite au 15<sup>ème</sup> cycle (Figure IV14c et IV14d), ce qui montre qu'il y a eu une attaque sulfatique externe.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

On conclue que le béton AC-1 a réagi avec les ions de sulfates après 15 cycles de protocole d'immersion/séchage à 60 °C.



**Figure IV.14** Etude microscopique du béton d'alfa pendant le protocole immersion/séchage à 60°C : (a) vacuole de AC (0 cycle) ; (b) surface de AC (0 cycle) ; (c) formation de nombreuses aiguilles sur la surface de AC (15 cycles) ; (d) zoom sur la vacuole de AC (15 cycles)



**Figure IV.15** Etude microscopique de béton de polypropylène dans le protocole immersion/séchage à 60°C :(a) vacuole de PC (0 cycle) ; (b) surface de PC (0 cycle) ; (c) formation de nombreuses aiguilles sur la surface de PC (15 cycles) ; (d) zoom sur la vacuole de PC (15 cycles)[4]

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

Pour le béton PC : les figures IV.15c et IV.15d montrent la présence de l'ettringite dans de nombreuses vacuoles mais pas dans les interfaces pâte/granulats après les 15 cycles. Il n'y a pas eu d'ASE prononcée.

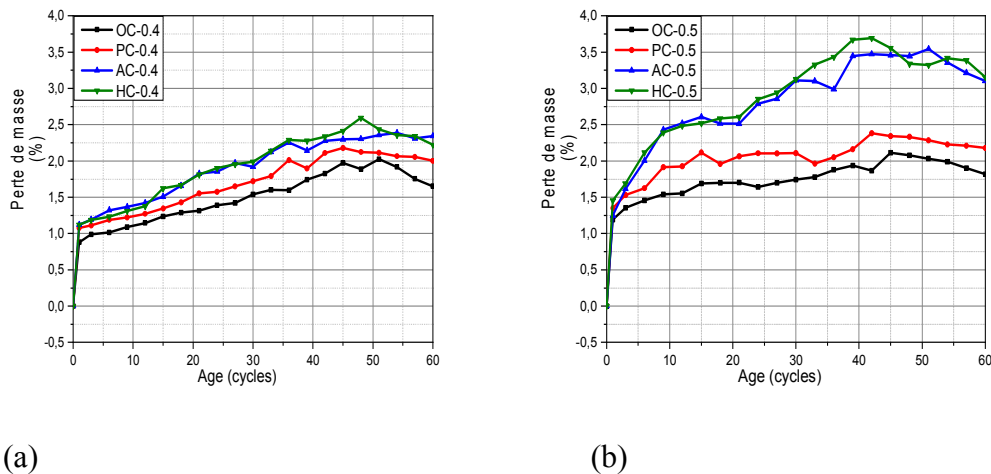
### IV.3.3 L'effet du rapport E/C

Le rapport eau/ciment affecte de nombreuses propriétés du béton telles que la distribution de la taille des pores, le raffinement des pores capillaires, et la résistance à la compression.

Deux rapports E/C ont été étudiés à savoir 0,4 et 0,5 dans le protocole immersion/séchage à 60°C.

#### IV.3.3.1 La perte de masse

La variation de la masse des différents bétons confectionnés en fonction du rapport E/C à 0, 5, 15,30 et 60 cycles d'immersion /séchage à 60°C dans le sulfate de sodium sont rassemblées dans la figure IV.16 :



**Figure IV.16** Evolution de la masse des bétons étudiés en fonction de rapport E/C.

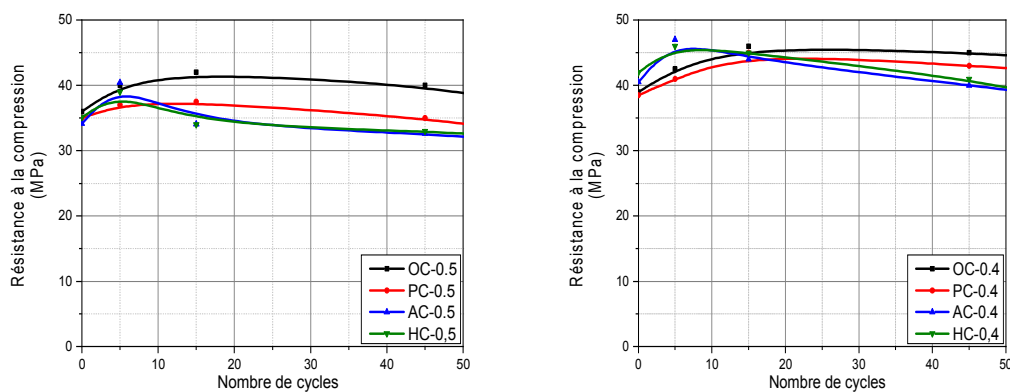
D'après la figure ci dessus, il y'a une prise de masse importante pour les bétons de rapport E/C égal à 0.5 contrairement à celle des bétons de rapport E/C égal à 0.4. Ce comportement est liée aux caractéristiques physiques des composites à savoir l'absorption d'eau et la porosité des bétons.

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

On déduit que, la variation de la masse du béton peut s'expliquer par les processus de transport, de perméabilité et de diffusion au sein de la matrice cimentaire. Ces propriétés de transport sont considérées comme des "indicateurs de durabilité" [14,15].

### IV.3.3.2 Résistance à la compression

La figure IV.17 représente l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons confectionnés à 0, 5, 15, 30 et 60 cycles en fonction du rapport E/C.



**Figure IV.17** Résistance à la compression des bétons étudiés en fonction de rapport E/C.

On constate que la plus faible résistance à la compression après exposition aux sulfates est celle des bétons ayant un rapport  $E/C = 0.5$  comparée à celle des bétons ayant un rapport  $E/C = 0.4$ . Malgré que les différents bétons sont à base du même ciment, c'est la différence des résistances est due à l'influence du rapport  $E/C$  qui modifie leurs comportements sous l'effet de la porosité.

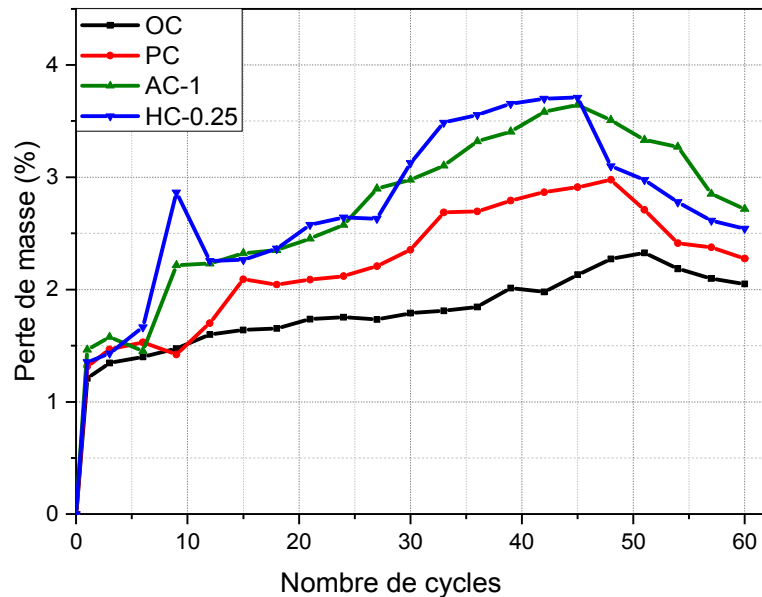
La porosité et l'absorption des différents bétons est proportionnelle au rapport  $E/C$  et à sa résistance. Plus  $E/C$  diminue, plus le matériau devient moins poreux et plus il devient plus dense et plus résistant (chapitre III).

Le gain de masse est accompagné d'une diminution de la résistance à la compression particulièrement en fin de protocole.

#### IV.3.4 Attaque des bétons par les sulfates de Magnésium ( $Mg_2SO_4$ )

##### IV.3.4.1 Variation en masse

La figure IV.18 représente la variation de la masse en fonction des cycles immersion/séchage à 60°C.



**Figure IV.18** Variation de la masse des bétons confectionnés en fonction des cycles / $Mg_2SO_4$ .

On remarque que les différents bétons suivent la même tendance vis-à-vis l'attaque aux sulfates de magnésium, comme c'est le cas des sulfates de sodium.

Le gain de masse évolue rapidement au terme du 1<sup>er</sup> cycle et continue à évoluer lentement jusqu'au 45<sup>ème</sup> cycle de protocole expérimentale. Ce comportement est attribué à la formation des nouveaux produits suite à la réaction des sulfates avec les hydrates de ciment. Ces produits tels que le gypse et l'ettringite se forment dans les pores, ce qui donne une structure dense et compacte [16].

Les bétons renforcés de fibres végétales ont les gains de masse les plus élevés, ces composites sont caractérisés par une structure très poreuse, ce qui assure des loges

## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

A partir du 45<sup>ème</sup> cycle, les bétons commencent à perdre de la masse, ce qui est du probablement du gypse et décalcification du gel C-S-H dans le béton, qui fissure les matériaux et provoque des chutes de masse. Ce constat est confirmé par la bibliographie [17].

### IV.3.4.2 Résistance à la compression :

La figure IV.19 représente la variation de la résistance à la compression pour les différents bétons étudiés en fonction de la durée d'immersion/séchage dans la solution de sulfate de magnésium.

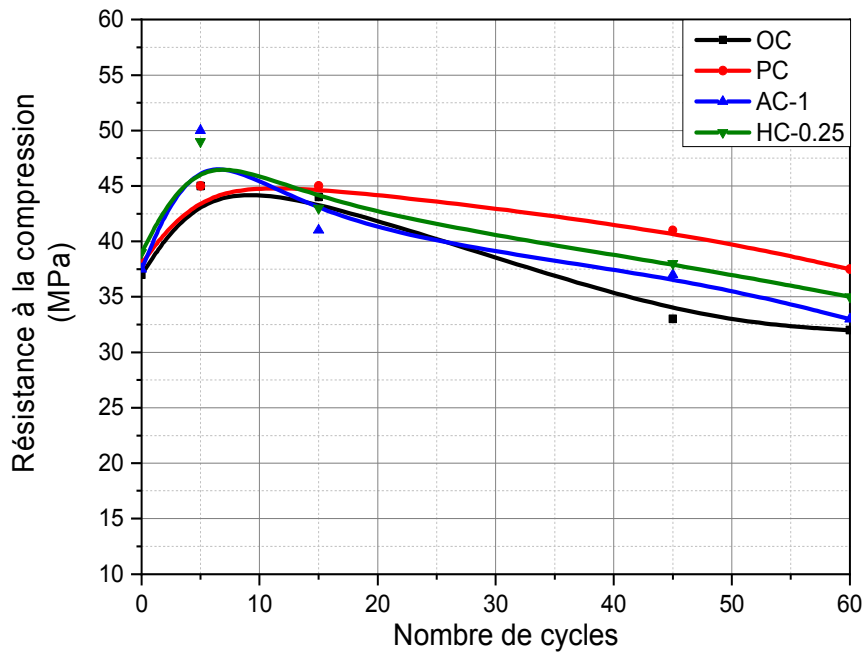


Figure IV.19 Résistance à la compression des bétons étudiés dans  $Mg_2SO_4$

Les résultats obtenus montrent une augmentation de la résistance à la compression dès le début du protocole et jusqu'au 15<sup>ème</sup> cycle, ceci est dû à l'hydratation continue des produits anhydres du ciment et à la réaction de  $MgSO_4$  avec  $Ca(OH)_2$  pour former de gypse, qui occupe les micropores et rend la structure plus dense et plus résistante. ,

L'augmentation de la résistance à la compression est plus significative dans le cas des bétons fibrés et plus particulièrement les bétons renforcés de fibres végétales, elle est



## Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques

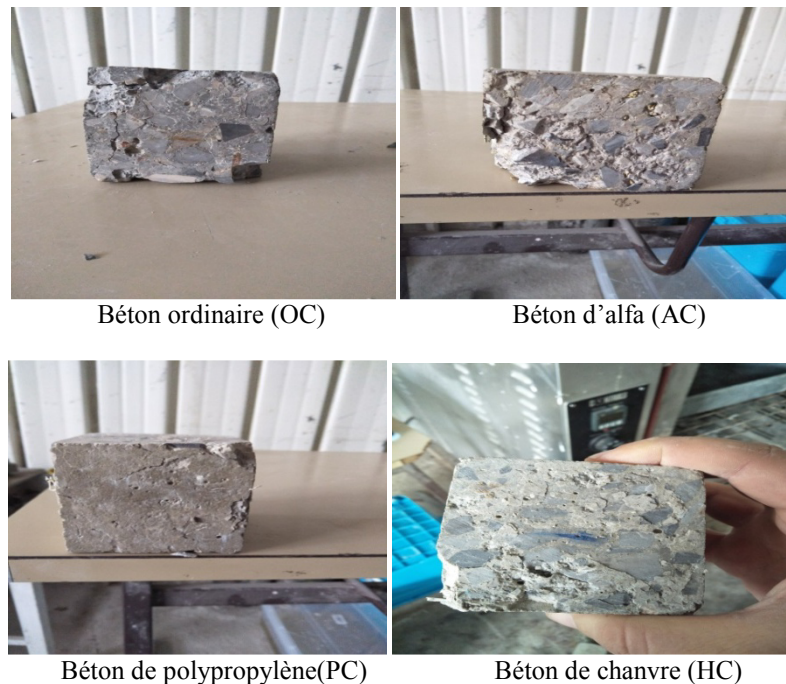
de 29 % pour AC-1 et de 23% pour le HC-0.25. Pour le PC et le OC, on note successivement une augmentation de 19,69% et 11%.

Les bétons à base des fibres végétales présentent les meilleures résistances au début de leur exposition à l'attaque sulfatique externe par les sulfates de magnésium, grâce à la porosité de leur matrice cimentaire.

A partir de 30<sup>ème</sup> cycles, on a remarqué une légère diminution des caractéristiques mécaniques de tous les bétons, qui continue sa baisse jusqu'à la fin du protocole.

La diminution est liée à une modification de la structure des différents bétons par formation d'un hydrate sulfaté gonflant, soit l'ettringite secondaire, qui conduit à la création des microfissures, signe d'une déstructuration ultérieure du matériau. Cela est confirmé à la bibliographie de [18].

Des photos ont été prises pour évaluer les signes de dégradation extérieure des éprouvettes en béton après 60 cycles d'immersion/séchage dans la solution 12.5%  $Mg_2SO_4$  (figure IV.20).



**Figure IV.20** Suivi macroscopique à la fin de protocole immersion/séchage( $Mg_2SO_4$ )

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

Les bétons renforcés de fibres végétales et le béton ordinaire présentent des signes de dégradation aux extrémités, ce qui n'est pas le cas du béton renforcé de fibres de polypropylène.

### **IV.4 Conclusion**

Les principales conclusions que nous pouvons tirer dans ce chapitre sont les suivantes:

1 - Les résultats d'essai de la résistance aux sulfates permettent d'observer un gain de masse jusqu'au 45<sup>ème</sup> cycle, puis on a remarqué une perte en poids et en résistance des bétons jusqu'au 60<sup>ème</sup> cycle.

2- L'amélioration des propriétés des bétons conservés dans une solution de sulfate est fonction d'un certain nombre de facteurs, dont l'hydratation continue du ciment et la formation du gypse et de l'ettringite dans les pores du composite. La perte de masse et de résistance suite au gonflement du béton engendre la fissuration et la désintégration du matériau.

3- Les différents composites ont la même tendance vis-à-vis de la contrainte à la rupture augmente jusqu'à 15<sup>ème</sup> cycles, ceci est dû probablement à la cristallisation des sels à l'intérieur des pores.

4- Les bétons (AC-1) et (HC-0.25) sont les deux bétons de structure, renforcés de fibres naturelles optimaux en tenant compte de leurs performances mécaniques. Plus l'apport en fibre augmente au-delà de 1% pour l'alfa et 0.25% pour le chanvre, plus les résistances à la compression diminuent.

5 – le béton renforcé de fibres de polypropylène (PC) accuse moins gain de masse, ce qui le rend plus résistant que celui renforcé de fibres végétales qui sont très poreuses.

6 - La plus faible résistance aux sulfates est celle des bétons à E/C = 0.5. Ce rapport modifie leur comportement, probablement à cause de la porosité des fibres et de la pâte cimentaire. Un faible rapport E/c confère au béton une plus compacité et une meilleure résistance.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

7 - Pour l'étude microscopique (MEB), à  $t_{15}$  on remarque l'absence de la formation de l'ettringite secondaire qui a commencé à partir de  $t_{45}$ , et qui a causé la dégradation des AC-1. Pour les autres bétons, aucun signe de dégradation n'a été signalé.

8 - Aucun endommagement visible macroscopiquement sur les échantillons soumis à l'immersion totale contrairement au protocole immersion/séchage à 60°C, qui est un protocole de vieillissement accéléré.

#### **IV.5 Les références bibliographiques**

[1] Bary B., Leterrier N., Deville E., Le-Bescop P., *Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar*, Cement & Concrete Composites, Vol 49 , pp.70–83, 2014.

[2] Haufe J., Vollpracht A., *Tensile strength of concrete exposed to sulfate attack*, Cement and Concrete Research, Vol 116 , pp. 81–88 , 2019.

[3] Cefis N., Comi C., *Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete*, Cement and Concrete Research , Vol 93 , pp. 57–70 , 2017.

[4] Ghrici M., Kenai S., Meziane E. *Mechanical and durability properties of cement mortar with Algeria, natural pozzolana*. Journal of Materials Science, Vol 41(21), pp.6965–6972, 2006.

[5] Kevin B., *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université d'Orléans, 2006.

[6] 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.

[7] Brunetaud X., *Etude de l'influence des différents paramètres et leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton*, Thèse de doctorat en Physicochimie des Matériaux, Ecole Centrale de Paris, 2005

[8] Brunetaud X., Linder R., Divet L., Duragrín D., Damidot D., *Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation*. Materials and Structures, Vol 40(6), pp. 567–578, 2007.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

- [9] Lane D. S., Ozyildirim H. C., Evaluation of the potential for internal sulfate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol 21(1), pp. 43–58, 1999.
- [10] Lee S.T., Moon H.Y., Swamy R.N., *Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss*, *Cement and Concrete Composites*, Vol 27, pp. 65 –76.
- [11] Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M. M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., *Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate*, *Cement and Concrete Composites*, Vol 25, pp. 429 – 437, 2002.
- [12] Ziane S., Khelifa M.R., Mezhoud S., Medaoud S., *Durability of concrete reinforced with alfa fibres exposed to external sulphate attack and thermal stresses*, *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol 25 , 566-588, 2020.
- [13] Khelifa M.R., Brunetaud X, ChabiL, Al-Mukhtar M., *conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur les bétons autoplaçants*, *Sciences & Technologie B – N°28* , pp 23-28 , 2008.
- [14] Jaubertie R., *Dégradations de mortiers sous différents milieux sulfatiques*, *Annales du bâtiment et des travaux publics* Septembre-Octobre 1999.
- [15] Yu Q., Sawayama K., Sugita S., Shoya M., Sojima Y., *The reaction between rice husk ash and  $Ca(OH)_2$  solution and the nature of its product*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 37-43, 1999.
- [16] Nehdi M et Hayek M , Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity, *Cement and Concrete Research*, Vol 35 , pp. 731 742, 2005
- [17] Ranjani I.S et Ramamurthy K., *Behaviour of foam concrete under sulphate environments*, *Cement & Concrete Composites* vol 34 , pp. 825–834 , 2012.
- [18] Turker F., Aköz F., Koral S., Yüzer N., *Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume*, *Cement and Concrete Research*, vol 27, pp. 205 – 214 , 1997.

## **Conclusion générale et perspectives**

## **Conclusion générale et perspectives**

### **I. Conclusion**

Les travaux de recherche de la présente thèse ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs : Le premier est de confectionner des bétons verts avec des dosages optimaux de fibres végétales non traitées, et le deuxième est d'étudier leur durabilité face aux attaques sulfatiques externes.

**La première phase** expérimentale a été consacrée à l'étude de l'effet des fibres d'alfa et de chanvre non traitées sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de structure de classe C 25/30, en fonction des paramètres de formulation, à savoir le dosage en fibres et le rapport Eau/Ciment. Deux bétons renforcés de fibres végétales ont été confectionnés, l'un renforcé de fibres d'alfa (AC) à 1 et 1.5% de fibres, et l'autre renforcé de fibres de chanvre (HC) à 0.25, 0.5 et 1% en volume de fibres. Deux bétons témoins ont été également confectionnés pour la comparaison des différents résultats obtenus, à savoir un béton ordinaire (OC) et un béton renforcé de fibres de polypropylène (PC). Cette phase nous a permis de conclure ce qui suit :

1 - L'incorporation des fibres dans le béton entraîne une diminution des paramètres d'ouvrabilité (l'affaissement et la densité), celle-ci est d'autant plus importante quand le taux de fibre dépasse le dosage optimal pour l'alfa et pour le chanvre. Ces paramètres sont également affectés par la porosité et le diamètre des fibres en question.

2- L'incorporation de fibres naturelles, qu'il s'agisse d'alfa ou de chanvre contribue à une légère diminution des résistances à la compression simple des différents bétons. Les résistances des bétons renforcés de fibres naturelles aux taux optimaux restent dans la plage des bétons de structure de classe C 25/30.

3 - Le pourcentage optimal de fibres végétales varie d'une fibre à l'autre, en fonction de plusieurs paramètres tels que la composition chimique, les caractéristiques mécaniques et la morphologie de chacune d'entre elles. Dans notre étude, les dosages optimaux en fibres sont : 1% pour l'alfa et 0,25% pour le chanvre. Les bétons correspondants à ces deux dosages peuvent remplacer aisément les bétons renforcés

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

de fibres de polypropylène, donnant naissance à des bétons économiques et écologiques.

4- La résistance à la traction en flexion du béton augmente avec l'incorporation de fibres, synthétiques soient-elles ou végétales. Cette caractéristique pourrait empêcher la propagation rapide des fissures dans le béton et l'éclatement soudain en cas de tremblement de terre de faible magnitude.

5- Les fibres végétales affectent les propriétés physiques des composites cimentaires ; elles contribuent à augmenter la porosité et l'absorption capillaire qui sont deux indicateurs primordiaux de la durabilité.

6- Le meilleur comportement des bétons fibrés a été attribués aux bétons ayant un  $E/C = 0.4$ . Ce rapport offre aux composites un meilleur comportement face aux attaques sulfatiques externes

**La deuxième phase** de la campagne expérimentale a pour objectif d'étudier le comportement des bétons fibrés face aux attaques sulfatique externes dont l'objectif est d'avoir un béton économique, écologique, résistant et durable face à cette pathologie. Deux protocoles de simulation d'attaque sulfatique externe ont été utilisés. Le premier est l'immersion complète et le deuxième l'immersion/séchage à  $60^{\circ}\text{C}$ , qui est un protocole de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe. Les résultats ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

1 - Le comportement du béton renforcé par des fibres face aux attaques sulfatiques externe est lié à la porosité et des fibres et de la matrice cimentaire. Une porosité élevée contribue à faciliter la migration des ions sulfates de sodium qui participent à un gain de masse du matériau et par conséquent à une dégradation rapide du composite.

2 - Aucun dommage visible par fissurations ou gonflement sur tous les échantillons soumis à l'immersion totale, donc pas de signe d'attaque sulfatique externe sous l'effet des sulfates de sodium.

3 - Une dégradation visible sur tous les échantillons soumis à l'immersion/séchage à  $60^{\circ}\text{C}$  face aux deux différents types de sulfates, suite à la formation d'ettringite secondaire dans les pores et les micropores. Les bétons à fort dosage en fibres végétales sont le plus altérés. Malgré les dégradations visibles sur tous les bétons

## **Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

renforcés de fibres naturelles, les résistances à la compression des AC-1 et HC-0.25 restent dans la fourchette des résistances d'un béton de structure de classe C 25/30.

4 - Le type et les caractéristiques de fibres influent fortement sur le comportement des bétons face aux attaques sulfatiques externes.

5 - Les bétons ayant un rapport  $E/C=0,5$  se sont dégradés plus que ceux ayant un rapport  $E/C=0,40$ . La diminution de la résistance à la compression est due à la pénétration des sulfates par diffusion dans les bétons à porosité élevée ( $E/C = 0.5$ ). La réduction du rapport  $E/C$  de 0,50 à 0,40 a ralenti la cinétique de dégradation à cause de la diminution des tailles de pores, mais ne l'a pas empêchée.

6 - l'anion associé au cation  $SO_4$  influe sur le comportement des bétons fibrés. Le  $Mg_2SO_4$  altère les bétons plus que le  $Na_2SO_4$ .

7- Les bétons AC-1 et HC-0.25 présentent le meilleur comportement face aux sulfates de sodium qui simulent les sulfates contenus dans les sols gypseux et des sulfates de magnésium qui simulent le milieu marin.

**En conclusion**, l'utilisation de fibres de chanvre et d'alfa non traitées à des quantités optimales dans le renforcement des bétons de structure offre des avantages économiques, sociales et environnementales meilleurs que ceux des bétons renforcés de fibres de polypropylène. Ces fibres naturelles non traitées sont disponibles dans les champs en grandes quantités, et poussent sans arrosage ni pesticides et ne nuisent pas à l'écosystème comparées aux fibres de polypropylène qui sont dérivées du pétrole. Les fibres végétales permettraient la production de bétons structurels verts et durables dits : « **Eco-friendly concrete** ».

## **II. Perspectives**

Notre étude pourrait être complétée par d'autres études dans le cadre de projets de recherche ou d'encadrement de doctorants, comme par exemple :

1- L'étude du comportement des bétons renforcés de fibres végétales face aux autres attaques chimiques comme l'attaque des acides.

2- L'utilisation de la modélisation pour la prédiction des fissurations plus particulièrement dans le cas des attaques sulfatiques.



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

3- L'utilisation des additions minérales comme les laitiers de hauts fourneaux, la pouzzolane ou la poudre de verre pour étudier l'adhérence des fibres naturelles avec la matrice cimentaire de ces bétons.

## **Références bibliographiques globales**

## Références bibliographiques

1. Achour A., *Etude des performances des mortiers renforcés de fibres naturelles : valorisation des plantes locales*, thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen, 2017.
2. Achour A., Ghomari F., Belayachi N., *Properties of cementitious mortars reinforced with natural fibers*. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol 31, pp.1938–1962, 2017
3. Acker P., *Comportement mécanique du béton: apports de l'approche physicochimique*, Rapport de recherche LPC n°152, p.121, 1988.
4. Adamopoulou E., Pipilikaki P., Katsiotis M.S., Chaniotakis M., Katsioti M., *How sulfates and increased temperature affect delayed ettringite formation (DEF) in white cement mortars*, Construction and Building Materials, Vol 25, pp. 3583-3590, 2011.
5. Afroughsabet V., Biolzi L., Monteiro P., *The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete*, Composites Part B, Vol 139, pp.84–96, 2011.
6. Agopyan V., Savastano H., John M., Cincotto M.A., *Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview*, Cement and Concrete Composite, Vol 27, pp. 527–536, 2005.
7. Akand L., Yang M., Wang X., *Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete*, Construction and Building Materials, Vol 163, pp.32–39, 2018.
8. Al-Amoudi O.S.B, Maslehuddin M., Saadi M., *Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements*, ACI Mater J, Vol 92, pp15–24, 1995.
9. AL-Amoudi O. S. B., Maslehuddin M., ABDUL-AL Y. A. B. *Role of chloride ions on expansion and strength reduction in plain and blended cements in sulfate environments*. Construction and Building Materials, Vol. 9, pp. 25-33, 1995.
10. Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C., Agrawal V., *Fiber distribution and orientation of macro-synthetic polyolefin fiber reinforced concrete elements*, Construction and Building Materials, Vol 122, pp.505–517, 2016.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

11. Al-Dulaijan S.U., Maslehuddin M., Al-Zahrani M.M., Sharif A.M., Shameem M., Ibrahim M., *Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate*, Cement and Concrete Composites, Vol 25, pp. 429 – 437, 2003
12. Alexandre M., Berton A., De Belin N., *Performance of Cement-Based Material in Aggressive Aqueous Environments*, Stat-of-the-Art Report, Rilem, Springer, 2013.
13. Ali M., Liu A., Sou H., Chouw N., *Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete*, Construction and Building Materials Vol 30, pp. 814–825, 2012.
14. Auger J., *Mise au point et développement d'un procédé d'aide à la déconstruction des ouvrages en béton armé*, thèse de doctorat en génie civil de l'université de Toulouse , 2009.
15. Aziz M.A., Paramasivam P., Lee S. L., *Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete Vol 3, pp.123-132, 1981.
16. Azwa Z.N., Yousif B.F., Manalo A.C, Karunasena W., *A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres*. Materials Vol 47 , pp. 424–42, 2013.
17. Baley C. *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. In: Techniques de l'ingénieur Ref: AM5 130, 2005.
18. Baley C., *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*. Techniques de l'Ingénieur, 2013.
19. Barbarulo A., *Comportement des matériaux cimentaires : Action des sulfates et de la température*, Thèse de doctorat, ENS Cachan (FR)-Université Laval (CA) ,2002.
20. Baroghel-Bouny V., *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances*, Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
21. Baron et Sauterey ., *Le béton hydraulique*, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris , 1982.
22. Bary B., Leterrier N., Deville E., Le Bescop P., *Coupled chemo-transport-mechanical modelling and numerical simulation of external sulfate attack in mortar*, Cement & Concrete Composites , Vol 49, pp. 70–83, 2014.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

23. Bassil S., *Etude de la répartition structurale des acides férulique et p-coumarique dans la chènevotte et la poudre organique de chanvre (Cannabis sativa) Exploration des voies de fractionnement pour l'obtention d'extraits à valeur ajoutée*, thèse de doctorat, l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2015.
24. Bassuoni M.T., Nehdi M.L., *Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading*, Cement and Concrete Research, 39 , pp. 206 – 226 , 2009.
25. Bederina M., Makhloufi Z., Bounoua A., Bouziani T., Quéneudec M., *Effect of partial and total replacement of siliceous river sand with limestone crushed sand on the durability of mortars exposed to chemical solutions*, Construction and Building Materials, Vol 47, pp.146-158 , 2013.
26. Bledzki A.K., Gassan J., *Composites reinforced with cellulose based fibers*. Progress in Polymer Science, Vol. 24 , pp.221-274 , 1999.
27. Benabed B., *Influence de la qualité et de la nature des sables sur les performances et la durabilité des bétons Autoplaçants*, Thèse de doctorat, En codirection entre l'université de Laghouat et l'université de Cergy-Pontoise, 2014.
28. Bentur A., *Fibre reinforced cementitious composites*, 2nd Edition, Taylor & Francis, London; New York, 2007.
29. Blanc G, *Développement de nouveaux composites cimentaires à bas module d'élasticité : propriétés mécaniques et durabilité vis-à-vis des sollicitations environnementales*, Thèse de doctorat en génie civil , Université Toulouse III Paul Sabatier , 2017.
30. Bordy A., *Influence des conditions thermo-hydriques de conservation sur l'hydratation de matériaux cimentaires à base d'une fine recyclée*, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pantoise, 2016.
31. Bouloc P., *Le chanvre industriel: production et utilisations* : France Agricole Editions, 2006.
32. Brandt A.M., *Fiber reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering*, Composite Structures, Vol 86 , pp.3-9, 2008.
33. Brown., *An evaluation of sulfate resistance of cements in a controlled environment*, Cement and Concrete Research, Vol , pp. 719-727 , 1981.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

34. Brunetaud X., Etude de l'influence des différents paramètres et leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton, Thèse de doctorat en Physicochimie des Matériaux, Ecole Centrale de Paris ,2005
35. Brunetaud X., Linder R., Divet L., Duragrín D., Damidot D., *Effect of curing conditions and concrete mix design on the expansion generated by delayed ettringite formation*, Materials and Structures, Vol 40(6), pp. 567–578, 2007.
36. Brunetaud X., Khelifa M.R., Al-Mokhtar M., *Size effect of concrete samples on the kinetics of external sulfate attack* , Cement & Concrete Composites , Vol 34 , pp. 370–376, 2012.
37. Carstens P.A.B. , Marais S.A., Thompson C.J., *Improved and novel surface fluorinated products*, J. Fluor. Chem., Vol 104 , pp 97–107 , 2000.
38. Cefis N., Comi C., *Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete*, Cement and Concrete Research , Vol 93 , 57–70, 2017.
39. Guillem C., *Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete*, Cement and Concrete Research, Vol 54, pp. 29–35, 2013.
40. Chafei S., *Influence de différents traitements sur les comportements rhéologique et mécanique d'un composite cimentaire mortier-fibres de lin*, Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Caen, France, 2014.
41. Chafei S., Khadraoui F., Boutouil M., Gomina M., *Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites*, Construction and Building Materials, Vol 54 , pp. 659– 664,2014.
42. Çomak B., Bideci A., Bideci O., *Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar*, Construction and Building Materials , vol 169 , pp. 794–799 ,2018.
43. Dallel M., *Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil*, Thèse de doctorat dans le génie des procédés, Université de haute Alsace, 2012.
44. Desa C., *Etude hydro-mécanique et thermomécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation*, Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.
45. Dhonde H.B., Mo Y.L., Hsu T.T.C., *Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams*, Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project 0-

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

4819 Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas, 2005.

46. Diam S., *The microstructure of cement paste in concrete* , proceeding of the 8th international on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, Vol 1, pp. 122-147, 1986.

47. Di Maida P , Sciancalepore S., Radi E., Bondioli F., *Effects of nano-silica treatment on the flexural post cracking behaviour of polypropylene macro-synthetic fiber reinforced concrete*, Mechanics Research Communications, Vol 88 , pp. 12–18 ,2018.

48. Dittenber D.B., GangaRao H.V.S., *Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol 43, pp. 1419 – 1429 , 2012.

49. Djoudi S., *Contribution de bioécologie des arthropodes dans des formations à stipa tenacissima L de la région de Djelfa*, Mémoire de magister, université de Tlemcen, 2013.

50. El Achaby M., Kassab Z., Barakatc A., Aboulkas A., *Alfa fibers as viable sustainable source for cellulose nanocrystals extraction: Application for improving the tensile properties of biopolymer nanocomposite films*, Industrial Crops & Products , Vol 112, pp. 499–510 , 2018.

51. El Hachem R., *Etude multi-critères de la dégradation des matériaux cimentaires par l'attaque sulfatique externe*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2010

52. El-Hachem R, Rozière E., Grondin F., Loukili A., *New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials*, Cement & Concrete Composites Vol 34 , pp.357–364, 2012.

53. Enfedaque L., Marcos G., Gálvez C, *Influence of Fiber Distribution and Orientation in the Fracture Behavior of Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete* , Materials ,Vol 12(2) , p.220 , 2019.

54. Feng P ., Edward J., Garboczi , Miao J., , Bullard W., *Microstructural origins of cement paste degradation by external sulfate attack* , Construction and Building Materials , Vol 96, pp. 391–403, 2015.

55. Fritih Y, *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*, Thèse de doctorat en génie civil , université INSA de Toulouse, 2009.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

56. Ghrici M., Kenai S., Meziane E., *Mechanical and durability properties of cement mortar with Algeria, natural pozzolana*. Journal of Materials Science, Vol 41(21), pp. 6965–6972 , 2006.
57. Golop R.S., Taylor H.F.W., *Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack, III. Sulfate resisting Portland cement: reaction with sodium and magnesium sulfate solutions*, Cement and Concrete Research, vol.25, 8, pp1581-1590, 1995.
58. Govin A., *Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment - Modification de l'hydratation du ciment par le bois*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Saint-Etienne, France, 2004.
59. Hacene B., *contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen*, Thèse de Doctorat, université abou bekr belkaid – Tlemcen ,2009.
60. Hager I., *Comportement à haute température des bétons à haute performance : évolution des principales propriétés mécanique*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
61. Hameed R., *Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques*, Thèse de doctorat , Université se Toulouse III Paul Sabatier, 2010.
62. Haufe J et Vollpracht A., *Tensile strength of concrete exposed to sulfate attack*, Cement and Concrete Research , Vol 116 , pp. 81–88, 2019.
63. Higgins D.D et Crammond N.J., *Resistance of concrete containing ggbs to the thaumasite form of sulfate attack*, In cement and concrete Composites, Vol 25 , pp 921- 929 , 2003.
65. Hossack A.M et Thomas M.D.A., *Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland limestone cement mortars*, Cement and Concrete Composites, Vol 56 , pp.115-120, 2015.
65. Ranjani I.S et Ramamurthy K ., *Behavior of foam concrete under sulphate environments*, Cement & Concrete Composites, Vol 34 , pp. 825–834 ,2012.
66. Irassar E.F., Bonavetti V.L., González M., *Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature*, Cement and Concrete Research, Vol 33, pp. 31-41 , 2003.
67. Irassar E.F., *Sulfate attack on cementitious materials containing limestone fillers - A review*, Cement and Concrete Research, Vol 39 , p241–254, 2009.



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

68. Jacob John M et Thomas S., *Bio- fibers and biocomposites*, Carbohydrate Polymers, Vol 71, pp. 343-364 ,2008.
69. Jaubertie R., *Dégradations de mortiers sous différents milieux sulfatiques*, annales du bâtiment et des travaux publics, 1999.
70. Jean Chills A., *Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration : Expérimentation et Modélisation*, Thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier – Toulouse III, 2008.
71. Jun Z, Guang-hui L, Ying Z. *Study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced fine aggregate concrete under action of freeze–thaw*. Concrete 2010.
72. Kevin B., *Etude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*, Thèse de doctorat en Sciences des Matériaux, Université d'Orléans, 2006.
73. Khatri R.P., Sirivivatnanon V., Yang J.L., *Role of permeability in sulfate attack*, Cement and Concrete Research , Vol 27 (8), pp.1179-1189 , 1997.
74. Khelifa M.R., Brunetaud X., ChabiL H., Al-Mukhtar M., *conséquences mécaniques de l'attaque sulfatique externe sur les bétons autoplaçants*, Sciences &Technologie B – N°28 , pp 23-28 , 2008.
75. 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.
76. Khelifa, M. R., & Guessasma, S., *New computational model based on finite element method to quantify damage evolution due to external sulfate attack on self-compacting concretes*. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol 28, pp.260–272, 2009.
77. Khelifa M.R., Leklou N., Bellal T., Hebert R.L., Ledesert A.B., *Is Alfa a vegetal fibre suitable for making green reinforced concrete?* , European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 22, pp.1–21, 2016.
78. Khelifa M.R., *Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables*, thèse en cotutelle internationale, Université de Cergy-Pontoise / Université Ferhat Abbas Sétif 1,2017.
79. Khokhar M.I., *Optimisation of concrete mix design with high content of mineral additions: Effect on microstructure, hydration and shrinkage*. Ecole Centrale de Nantes, 2010.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

80. Khoury GA., *Polypropylene fibers in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria*. Mag Concrete Research , Vol 60(3) , PP189–204, 2008.
81. Kriker A., Debicki G., Bali A., Khenfer M., Chabannet M., *Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*. Cement and Concrete Composites , Vol 27, pp.554-564 , 2005.
82. Laachachi A. et El Bouari , *Effect of surface modification on morphological, mechanical and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp – Polyurethane composite*, Case Studies in Thermal Engineering , 2017.
83. Lane D. S et Ozyildirim H. C., *Evaluation of the potential for internal sulfate attack through adaptation of ASTM C 342 and the Duggan test* , Cement, Concrete and Aggregates, Vol 21(1), pp.43–58, 1999.
84. Lawrence CD., *Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature*. Cement and Concrete Research, Vol 25(4) , pp. 903-14, 1995.
85. Lee S.T., Moon H.Y., Swamy R.N., *Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss*, Cement and Concrete Composites, Vol 27, pp. 65 –76 , 2005.
86. Leemann A., et Loser R., *Accelerated sulfate resistance test for concrete – chemical and 153 microstructural aspects*, Second international conference on microstructural – related durability of cementitious composites, Amsterdam, 2012.
87. Le Troedec M., Rachini A., Peyratout C., Rossignol S., Max E., Kaftan O., *Influence of chemical treatments on adhesion properties of hemp fibers*. J Colloid Interface Science , Vol 356 , pp. 303–10 , 2011.
88. Makeni A., *influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons*, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
89. Mangat P.S., El-Khatib J.M., *Influence of initial curing on sulphate resistance of blended cement concrete*, Cement and Concrete Research, Vol 22 , pp. 1089-1100, 1992.
90. Magniont C, *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agro ressources*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

91. Mansur M. A. et M. A. Aziz . *A study of jute fibre reinforced cement composites*. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol 4, pp. 75-82, 1982.
92. Marchand J., Older I., Skalny J.P., *Sulfate Attack on Concrete*, CRC Press , 2003.
93. Merta I., et Tschegg E.K., *Fracture energy of natural fiber reinforced concrete*, Construction and Building Materials , Vol 40, pp. 991–997 , 2013.
94. Messad S., *Mise au point d'un essai de Vieillissement accélérée de l'attaque sulfatique externe pour l'application du concept de performance équivalente dans le cadre de la norme NF EN 206-1* , Thèse de Doctorat, Toulouse , Université de Toulouse, 2009.
95. Massaad G., Rozière E., Loukili A., Izoret L., *Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks*, Construction and Building Materials , Vol 127 , pp. 918–931 , 2016.
96. Massaad G., Rozière E., Loukili A., Izoret L., *Do the geometry and aggregates size influence external sulfate attack mechanism?* , Construction and Building Materials Vol 157, pp. 778-789, 2017.
97. Mehta P.K ., *Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review*, Materials Science of Concrete III, the American Ceramic Society, pp. 105-130, 1993.
98. Mehta. K, Paulo J.M., Monteiro ., *Concrete “Microstructure, Properties, and Materials”*, Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, Third Edition 2006.
99. Molez L., Bian H., Prince-Agbodjan W., *Résistance au gel/ dégel des BFUHP: Compétition entre endommagement et cicatrisation*.Chambéry, Savoie: XXXe Rencontres de l'AUGC-IBPSA ,2012.
100. Monteiro P.J.M, Kurtis K.E., *Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack*, Cement and Concrete Research , Vol 33 , 987–993 , 2003.
101. Nguyen L.H., *Béton de structure à propriétés d'isolation thermiques améliorées: Approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat en Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2016.
102. Nehdi M., M. Hayek, *Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity*, Cement and Concrete Research, Vol 35, 731-742 , 2005.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

103. Niyigena C, *Variabilité des performances de bétons de chanvre en fonction des caractéristiques de la chènevotte produite en Auvergne*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2014.
104. Nonat, A., *L'hydratation des ciments*, In: J.P. Ollivier, A. Vichot (Éd.), *La durabilité des bétons*. Presse de l'ENPC, p.25–50 , 2008.
105. Nozahic V, Ameziane S., *Effect of different treatments on the interface between the lignocellulosic particles and an inorganic binder* , The 29th Meeting of the AUGC. Tlemcen, Algeria, p. 236–246 , 2011.
106. Okeola A, Abuodha S. O., Mwero J., *Experimental investigation of the physical and mechanical properties of sisal fiber-reinforced concrete*, *Fibers* , Vol 6, p. 0053 , 2018.
107. Ollivier J.P., Maso J.C., Bourdette, B., *Interfacial transition zone in concrete*. *Advanced Cement Based Materials*, Vol (2), pp. 30–38, 1995.
108. Ollivier J.P. et Vichot A., *La durabilité des bétons. Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2008.
109. Page J., Khadraoui F., Boutouil M., Gomina M., *Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers*, *Construction and Building Materials* Vol , 140 , pp .344–353, 2017.
110. Paiva M.C., Ammar I., Campos A.R., Cheikh R.B., A.M. Cunha, *Alfa fibers: Mechanical, morphological and interfacial characterization*, *Composites Science and Technology* , Vol 67 , pp. 1132–1138, 2007.
111. Ping X , Beaudoin J.J., Brousseau R., *Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface*, *Cement and Concrete Research*, Vol 21 , pp.999-1005 , 1991.
112. Pourchet S., Regnaud L., Perez J.P., Nonat A., *Early C<sub>3</sub>A hydration in the presence of different kinds of calcium sulfate* , *Cement and Concrete Research* Vol 39, pp. 989- 996, 2009.
113. Prasad J., Jain DK., Ahuja AK.. *Factors influencing the sulphate resistance of cement concrete and mortar*. *Asian Journal Civil Engineering (Build Housing)* , Vol 7 , pp. 259–68 , 2006.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

114. Puls J., and Saake B., *Industrially Isolated Hemicelluloses*, Hemicelluloses: Science and Technology, PACS Symposium Series 864; American Chemical Society: Washington, DC, pp 24–37 , 2004.
115. Ragoubi M., *Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne*, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy ,2010.
116. Ragoug R., *Attaque sulfatique externe des matériaux cimentaires : Impact de différents facteurs âge, composition du liant, présence de chlorures*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est en Structures et Matériaux, 2016.
117. 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, Vol 5, pp. 3–13 , 1983.
118. Ranalli P., *Advances in hemp research* ., Food Products Press, 1999 .
119. Rapport «Hangar de Stockage Sidi Khelifa – *Coopérative de céréales et légumes secs - Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est, Constantine Algérie, 2004.
120. Rapport «*Pont sur Oued Djeddi – Wilaya de Biskra*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, Constantine (Algérie), 2004.
121. Rapport «*Station de traitement des eaux de Ain-Tinn – Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est, Constantine (Algérie) , 2006.
122. Rapport préliminaire «*Glissement CW134 - Wilaya de Mila*», Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTPEst, C onstantine (Algérie), 2006.
123. Rapport «*Constatation de la dégradation du béton de l'usine de fabrication des batterie de voitures Bouzghaya - Batna*», Service Environnement de la wilaya de Batna, 2008.
124. Regourd M., *L'eau dans Le béton hydraulique*, Paris, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vol 1982 , pp.59–68.
125. Report of the thaumasite Expert Group. *The thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction*. Department of Environment, Transport and the Regions (now, the Construction Industry Directorate of the Department of Trade and Industry), London, 1999.
126. Revertegat E., Richet C., Gégout P., *Effect of pH on the durability of cement pastes*, Cement and Concrete Research, Vol 22 , pp. 259-272 ,1992.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

127. Rogge E., *Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'Alfa (Esparto grass) en vue d'applications textiles*. Mémoire de maîtrise pour l'obtention du grade académique de master, Génie des matériaux, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (UHA, Mulhouse, France), Année universitaire 2010.
128. Roux A.L.E., Orsetti S., *Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés*, Bulletin Des Laboratoires Des Ponts ET Chaussées, Vol 225 , pp. 41-50, 2000.
129. Rossi P., ACKER P., MALIER Y . , *Effect of steel fibers at two different stages: the material and the structure*, Materials and structures, vol 20 pp. 436-439, 1987.
130. Roziere E., *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2007.
131. Rozière E., Loukili A., El Hachem. R., Grondin F., *Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks*, Cement and Concrete Research, Vol 39 , pp.1188–1198 , 2009.
- 132 . Sair S, Oushabi A., Kammouni A., Tanane O., Abboud Y., Oudrhiri Hassani F., *Effect of surface modification on morphological, mechanical and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp–Polyurethane composite*, Case Studies in Thermal Engineering , Vol 10 , pp.550-559, 2017
133. Salgues M, *Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : Application aux barrages en béton*, thèse de doctorat , Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) , 2013.
134. Santhanam M., Cohen M.D., Olek J., *Sulfate attack research – whither now?*, Cement and Concrete Research , Vol 31, pp.845-851, 2000.
135. Santhanam M., Cohen, M.D., Olek J. *Modeling the effects of solution temperature and concentration during sulfate attack on cement mortars*, Cement and Concrete Research, Vol 32 585-592 ,2002.
136. Santhanam M., Cohen M.D., Olek. J., *Mechanism of sulfate attack: a fresh look, Part 2. Proposed mechanisms*, Cement and Concrete Research, Vol 33 , p 341–346 ,2003.
137. Saradhi Babu D., Ganesh, Babu K., Wee T.H., *Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete*. Cement and Concrete Composites, Vol 28, pp.520–527, 2006.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

138. Sarvaranta L., Elomaa M., Jarvela E., *A study of spalling behaviour of PAN fiber-reinforced concrete by thermal analyses*, Fire Materials Vol 17 (5) , pp. 225–230 ,1993.
136. Sarvaranta L., Mikkola E., *Fiber mortar composites under fire conditions: effects of ageing and moisture content of specimens*, Materials and Structure Vol 27 , pp 532–538 , 1994.
139. Savastano H., Agopyan V., Nolasco A.M., *Plant fibre reinforced cement components for roofing*. Construction and Building Materials, Vol 13 , pp.433–438 ,1993 .
140. Savastano H., Warden P.G., Coutts R.S.P., *Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites*, Cement Concrete and Composite , Vol 27 , pp.583–592 , 2005.
141. Scrivener K.L., Nonat A., *Hydration of cementitious materials, present and future*, Cement and Concrete Research , Vol 41 , pp.651-665 , 2011.
142. Sebaibi N., Benzerzour M., Abriak N., *Influence of the distribution and orientation of fibers in a reinforced concrete with waste fibers and powders* , Construction and Building Materials , Vol 65 , pp. 254–263 , 2014.
143. Secco M. , Lampronti G., Schlegel M., Maritan L., Zorzi F., *Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate–phosphate attack*, Cement and Concrete Research , Vol 68 , pp. 49–63 , 2015.
144. Sedan D., *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*. Thèse de Doctorat, université de limoges, 2007
145. Sedan D., Pagnoux C., Smith A., *Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction*. Journal of the European Ceramic Society , Vol 28 , pp.183–192, 2008.
146. Sellami A., *Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (Diss): Caractérisation, durabilité et application au cas de la maçonnerie*. Thèse de Doctorat, Université d’Annaba, Algérie 2015.
147. Shahzad A., *Hemp fiber and its composites – a review*, Journal of Composite Materials, Vol 46(8) , 973-986 , 2012.

**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

148. Shoukry H., Kotkata M.F., Abo-EL-Enein S.A. , *Thermo-physical properties of nanostructured lightweight fiber reinforced cementitious composites*. Construction Building Materials, Vol 102 , pp.167–174, 2016.
149. Simões T,H. Costa D., Dias-da-Costa, Júlio, E., *Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes*, Construction and Building Materials , Vol 137 , pp. 548–556 , 2017.
150. Skalny, *Internal sulfate attack - points of agreement and disagreement » In: Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, RILEM proceedings PRO 35, 2002.
151. Skaropoulou A., Kakali G., Tsvivilis S., *Thaumasite form of sulfate attack in limestone cement concrete: The effect of cement composition, sand type and exposure temperature*, Construction and Building Materials, Vol 36 , 527-533 , 2012.
152. Soylev T.A., et Ozturan T., *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*, Construction and Building Materials , Vol 73 , pp. 67–75 , 2014.
153. Taylor H.F.W., *Cement chemistry*, Academic press, 1997.
154. Thiebaud S, *Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux*. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 1995.
155. Touloum N, et Brara A., *Evidence of thaumasite formation in a newly built concrete structure in northeastern algeria*, Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction INVACO en Algérie, pp. 343-348. 17 et 18 Novembre 2014 .
156. Tranle D, *études des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur Application au bâtiment*, thèse de doctorat, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2010.
157. Turker F., Aköz F., Koral S., Yüzer N., *Effects of magnesium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume*, Cement and Concrete Research, Vol 27, pp. 205 – 214 , 1997.
158. Vernet C., Cadoret G., *Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours*. In: Y. Malier (Éd.), Les B.H.P., caractéristiques, durabilité, applications. Presse de l'ENPC, Paris, p.115–128, 1992.



**Comparaison des résistances mécaniques des bétons renforcés de fibres synthétiques et de fibres naturelles soumis à des agressions chimiques**

159. Vivekanandam K., Patnaikuni I., *Transition zone in high performance concrete during hydration*, Cement and Concrete Research, Vol. 27, pp. 817-823, 1997.
160. Walker R, S. Pavia, R. Mitchell, *Mechanical properties and durability of hemp-lime concretes*, Construction and Building Materials 61 (2014) 340–348.
161. Wei. J., Meyer. Ch., *Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites*. Cement and Concrete Research 73 1–16, 2015.
162. Xiaojian G., Baoguo M., Yingzi Y., Anshuang S., *Sulfate Attack of Cement-Based Material with Limestone Filler Exposed to Different Environments*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 17, N°4 , p543–549 , 2008.
163. Xie X, Zhou Z, Jiang M ., *Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties*. Compos Part B: Engineering Vol 78, pp.153–161 , 2015.
164. Xing Z, *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de Doctorat à l'université de Gergy-pontoise, 2011.
165. Yahiaoui L., *Characterization of to rupture of composite based with vegetable fibers (Diss)*, Magister Thesis in Mechanical Engineering, Setif: Ferhat Abbas University, 2011.
166. Yang S., Zhongzi X., Mingshu T., *The process of sulfate attack on cement mortars*, Advanced Cement Based Materials, Vol 4, pp. 1-5, 1994
167. Yu Q., Sawayama K., Sugita S., Shoya M., Sojima Y., *The reaction between rice husk ash and  $ca(OH)_2$  solution and the nature of its product*. Cement and Concrete Research, Vol 29, pp. 37-43, 1999.
168. Yuan Y., Li G., Cai Y., *Modeling for prediction of restrained shrinkage effect in concrete repair*. Cement and Concrete Research, Vol 33, pp. 347-352, 2003.
169. Ziane S., Khelifa M. R., Mezhoud S., Medaoud.S, *Durability of concrete reinforced with alfa fibers exposed to external sulphate attack and thermal stresses*, Asian Journal of Civil Engineering, Vol 21, pp. 555–567, 2020.