

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil et Hydraulique.
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : GÉNIE CIVIL

Option : Modélisation des Matériaux et Structures

**Etude expérimentale et théorique du comportement
mécanique des mortiers et bétons fibrés**

Présenté par :

BOULHENDI Meriem

Soutenu publiquement le

Devant le jury composé de :

Dr. MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. ZATAR Abdallah	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Dr. BOUAZIZ Ahmed	Maitre de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. MEZGHICHE Bouzidi	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Dr. GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Examineur	Université de Biskra

REMERCIEMENT

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire Matériaux de Constructions au département Génie Civil et Hydraulique de l'Université Mohamed Khider Biskra.

Je désire en tout premier lieu adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur M. Bouaziz Ahmed ; maitre de conférence au département Génie Civil et Hydraulique ; pour m'avoir dirigé. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa patience tout au long de ce travail, ainsi que pour ses conseils et ses idées.

J'exprime ma plus sincère gratitude à M. Mellas Mekki; professeur au département Génie Civil et Hydraulique de l'Université de Mohamed Khider Biskra; de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie vivement le Professeur Guettala Abdelhamid et les Docteurs Mezghiche Bouzidi et Zatar Abdallah d'avoir accepté de juger ce médiocre travail.

J'exprime ma plus sincère gratitude à tous mes enseignants de graduation et post graduation que j'avais l'honneur d'être parmi leurs étudiants.

Je salue tous mes collègues de la première année magister .

.....A toute ma famille

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude du comportement mécanique des mortiers et bétons fibrés par rapport à ceux non fibrés, nous avons réalisé deux compositions de mortier et une composition pour le béton soumis aux essais mécaniques de compression et de traction par flexion à 7 et 28 jours, dans cette étude les fibres de polypropylène et les fibres d'acier ont été utilisées à différentes teneurs pour voir d'une part l'influence du type et de la teneur des fibres sur le comportement mécanique des bétons et mortiers, et d'autre part pour connaître le rendement des caractéristiques géométriques tel que la longueur et la forme des fibres sur ce comportement, ensuite l'effet de l'ajout de la fumée de silice pour les mortiers et béton fibrés ont été aussi étudiés.

Il en ressort de cette étude que les mortiers et bétons fibrés présentent des comportements différents à ceux des mortiers et bétons témoins, l'introduction des fibres mène à augmenter principalement la ductilité des bétons et mortiers aux contraintes de traction.

Mots clés :

comportement mécanique ,fibre d'acier, fibre de polypropylène, mortier fibré, béton fibré

Summary

The aim of this work is to study the mechanical behavior of fiber-reinforced mortar and concrete compared to non-reinforced ones ,we have produced two mortar admixtures and only one for concrete; they are subjected to mechanical tests of compression and tensile bending at 7 and 28 days, in this study the polypropylene fibers and steel fibers were used at different contents to determine at one hand the influence of the type and the content of fibers on the mechanical behavior of mortars and concrete, and on the other hand to learn the benefit of the geometric characteristic as the length and the shape of the fibers on this behavior, then the effect of the addition of the silica-fume to fiber reinforced mortars and concrete was also studied. The results of this study show that the fiber-reinforced mortars and concretes are behaving differently to witness ones, the introduction of fiber leads mainly to improve the brittleness of concrete and mortars under tension strength.

Keywords :

mechanical behavior, steel fiber, polypropylene fiber, fiber-reinforced mortar, fiber-reinforced concrete

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة التصرف الميكانيكي للملاط و الخرسانة المدعمن بالألياف مقارنة بتصرف الملاط و الخرسانة غير المسلحة بالألياف ،قمنا بعمل تركيبتين للملاط وتركيبية واحدة للخرسانة وإخضاعهما للاختبارات الميكانيكية للضغط والشد بالانحناء عند 7 أيام و 28 يوم ، في كل الدراسة استخدمت ألياف البولي بروبيلين والألياف الفولاذية بنسب مختلفة لمعرفة تأثير نوع ونسبة الألياف في السلوك الميكانيكي للمركبات ذات المصفوفة الإسمنتية من ناحية ، و للتعرف على أداء الخصائص الهندسية مثل طول وشكل الألياف على سلوك هذه المركبات من ناحية أخرى، أيضا قمنا بدراسة تأثير إضافة دخان السيليكا إلى الملاط و الخرسانة المدعمن بالألياف.

نستخلص من هذه الدراسة إلى أن للملاط و للخرسانة المدعمن بالألياف تصرف مختلف عن تصرف الملاط و الخرسانة غير المدعمة بإضافة الألياف يؤدي أساسا إلى تحسين هشاشة الخرسانة و الملاط تحت تأثير الشد.

SOMMAIRE

Résumé	
Listes des figures	
Listes des tableaux	
Introduction générale	
Chapitre I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	03
I.1.1 Introduction	03
I.1.2 Définition	03
I.1.3 Fraction volumique et massique	04
I.1.3.1 Fraction volumique	04
I.1.3.2 Fraction massique	04
I.1.4 Domaines d'application des matériaux composite	04
I.1.5 Classification des matériaux composites	05
I.1.5.1 Classification suivant la forme des constituants	05
I.1.5.2 Classification suivant la nature des constituants	05
I.1.6 Loi des mélanges	06
I.1.7 Endommagement des composites	07
I.1.7.1 Fissuration matricielle	07
I.1.7.2 Rupture de fibre	08
I.1.7.3 Décohésion fibre-matrice	08
I.1.7.4 Délaminage	09
I.2. Composites ciments-fibres	09
I.2.1 Historique	09
I.2.2 Les composites ciments -fibres	09
I.2.3 Les fibres	10
I.2.3.1 Les types des fibres	10
I.2.3.1 Fibres de polypropylène	10

I.2.3.1	Fibres d'amiante	11
I.2.3.1.3	Fibres d'acier	11
I.2.3.1.4	Fibres de carbone	12
I.2.3.1.5	Fibres de verre	13
I.2.3.2	Caractéristiques des renforts fibreux	14
1.2.4	Processus de couture des fissures	15
I.2.3.5	Rôle des fibres	16
I.2.3.6	Apport de fibre	16
I.2.3.7	Désavantages des fibres	17
I.2.3.8	Domaines d'applications des composites cimentaires	17
I.2.3.9	Durabilité des bétons de fibres	18
I.3	Comportement mécanique des bétons renforcés des fibres	20
I.3.1	Comportement en traction uni axiale	22
I.3.2	Comportement en flexion	23
I.3.1	Comportement en compression uni axiale	25
CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISÉES		28
II.1	Introduction	28
II.2	Matériaux utilisés	28
II.2.1	Le ciment	28
II.2.2	Les granulats	29
II.2.2.1	Le sable	29
II.2.2.2	Les graviers	32
II.2.3.	L'adjuvant	34
II.2.4.	Eau de gâchage	35
II.2.5	Les fibres	35
II.2.5.1	Fibre de polypropylène	35
II.2.5.2	Fibre d'acier	36
II.2.6	Le Fumée de silice	36
II.3	Mélanges	36
II.3.1	Codification des mélanges	36
II.3.2	Compositions des mélanges	37
II.3.3	Fabrication et conservation des corps d'épreuve	39

II.4	Caractéristiques a l'état frais	40
II.4.1	Ouvrabilité du mortier	40
II.4.2	Essai d'affaissement au cône d'Abrams	40
II.5	Caractéristiques a l'état durci	41
II.5.1	Essai de traction par flexion du mortier	41
II.5.2	Essais de traction par flexion du béton	41
II.5.3	Essai de compression du mortier	42
II.5.4	Essai de compression du béton	42
II.6	Conclusion	43
CHAPITRE III ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS		44
III.1	Introduction	44
III.2	Programme expérimental	44
III.3	Caractéristiques mécaniques a l'état frais	45
III.4	Caractéristiques mécaniques a l'état durci	46
III.4.1	Etude de comportement mécanique des mortiers	46
III.4.1.1	Essai de traction par flexion	46
III.4.1.1.1	Essai de traction par flexion du mortier 1	46
III.4.1.1.2	Essai de traction par flexion du mortier 2	51
III.4.1.2	Essai de compression	52
III.4.1.2.1	Essai de compression du mortier 1	52
III.4.1.2.2	Essai de compression du mortier 2	56
III.4.2	Etude du comportement mécanique des bétons fibrés	57
III.4.2.1	Essai de traction par flexion du Béton	57
III.4.2.2	Essai de compression du béton	62
III.5	Conclusion	66

LISTES DES FIGURES

Figure. I.1.Matériau composite	3
Figure I.2 : Différents mélanges possibles pour la formation de matériaux composites à partir des trois types des matrices	5
Figure I.3: Relation contrainte-déformation en traction pour les différents composants	6
Figure I.4: Modes de rupture des matériaux composites	8
Figure I.5 : les fibres de polypropylène	11
Figure I.6 : les fibres d'acier	12
Figure I.7 : tissus en fibre de verre	13
Figure I.8 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres	16
Figure I-9 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction	20
Figure I-10 : Schématisation de l'orientation des fibres métallique dans le béton	21
Figure I-11: Courbe contrainte-déformation du béton soumis à une traction uni axiale	23
Figure I.12: Courbes du comportement typique d'un échantillon (1) de ciment pur et (2) d'un composite ciment/fibres en flexion 3 points	24
Figure I.13:Evolution du comportement mécanique du composite ciment-fibres en flexion3 points	25
Figure I-14: Courbe contrainte-déformation du béton soumis à une compression uniaxiale	26
Figure I-15 : Courbes « contrainte- déformation » en compression	27
Figure II.01 : Courbe granulométrique du sable de Lioua	30
Figure II.02 : Courbe granulométrique du sable reconstitué	31
Figure II.03: Courbe granulométrique du gravier 3/8	33
Figure II.04 : Courbe granulométrique du gravier 7/16	34
Figure II.05 : Le super plastifiant MEDAPLAT SP 40	34
Figure II.06 : Les fibres utilisées	35

Figure II.07 : Table à secousses	40
Figure II.08 : Cône d'Abrams pour l'essai d'affaissement	41
Figure II.09 : Appareil de l'essai de traction par flexion trois points	41
Figure II.10 : Presse hydraulique de flexion	42
Figure II.11 : Presse hydraulique pour l'essai de	44
Figure III.01 : Résistance à la traction par flexion pour la série 1 du mortier 1	47
Figure III.02 : Résistance à la traction par flexion pour la série 2 du mortier 1	47
Figure III.03 : Les bulles de fibre en mortier fibré de 4% de fibre de polypropylène	48
Figure III.04 : La fragilité de mortier non fibré	49
Figure III.05 : La ductilité du mortier fibré	49
Figure III.06 : Résistance à la traction par flexion pour la série 3 de mortier 1	49
Figure III.07 : Résistance à la traction par flexion pour la série 4 de mortier 1	50
Figure III.08 : Résistance à la traction par flexion pour la série 1 de mortier 2	52
Figure III.09 : Résistance à la traction par flexion pour la série 2 de mortier 2	52
Figure III.10 : Résistance à la traction par flexion pour la série 3 de mortier 2	52
Figure III.11 : Résistance à la compression pour la série 1 de mortier 1	53
Figure III.12 : Résistance à la compression pour la série 2 de mortier 1	53
Figure III.13 : Résistance à la compression pour la série 3 de mortier 1	54
Figure III.14 : Résistance à la compression pour la série 4 de mortier 1	55
Figure III.15 : Résistance à la compression pour la série 1 de mortier 2	56
Figure III.16 : Résistance à la compression pour la série 2 de mortier 2	56
Figure III.17 : Résistance à la compression pour la série 3 de mortier 2	57
Figure III.18 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 1-	58
Figure III.19 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 2-	58
Figure III.20 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 3-	60
Figure III.21 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 4-	61
Figure III.22 : Résistance à la compression pour le béton - série 1-	63
Figure III.23 : Résistance à la compression pour le béton - série 2-	63
Figure III.24 : Résistance à la compression pour le béton - série 3-	64
Figure III.25 : Résistance à la compression pour le béton - série 1-	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.01 : Exemples de matériaux composites-pris au sens large	04
Tableau I.02 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées	15
Tableau I.03 : Intérêts apportés par l'ajout de fibres	18
Tableau II.01 : Composition chimique de ciment	28
Tableau II.02 : Composition minéralogique du ciment	29
Tableau II.03 : Caractéristique du ciment	29
Tableau II.04 : La composition granulométrique du sable reconstitué	29
Tableau II.05 : Analyse granulométrique du sable de Lioua 0/5	30
Tableau II.06 : Analyse granulométrique du sable reconstitué	31
Tableau II.07 : Analyse granulométrique du gravier 3/8	32
Tableau II.08 : Analyse granulométrique du gravier 7/16	33
Tableau II.09 : Codification des bétons	37
Tableau II.10 : Codification des mortiers	37
Tableau II.11 : Compositions des mélanges	39
Tableau III.1 : L'ouvrabilité des bétons et des mortiers	45
Tableau III.2 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le mortier 1	46
Tableau III.3 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le mortier 2	51
Tableau III.4 : Résultats de l'essai de compression pour le mortier 1	52
Tableau III.5 : Résultats de l'essai de compression pour le mortier 2	56
Tableau III.6 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le béton	57
Tableau III.7 : Résultats de l'essai de compression pour le béton	62

LISTE DES SYMBOLES

v_c : Le volume de matériau composite

v_f : Le volume de fibres

v_m : Le volume de matrice

V_f : La fraction volumique de fibres

V_m : La fraction volumique de matrice

p_c : La masse de matériau composite

p_f : La masse de fibres

p_m : La masse de matrice

P_f : La fraction massique de fibres

P_m : La fraction massique de matrice

σ_c : La résistance du composite à la première fissuration

σ_f : La contrainte de traction dans la fibre au moment de la première fissuration

V_f : Le pourcentage volumique des fibres

σ_m : La résistance à la traction de la matrice



**INTRODUCTION
GENERALE**

INTRODUCTON GENERALE

La technologie de la construction se développe, s'accroît le besoin en matériaux dont les caractéristiques et la méthodologie d'emploi sont mieux adaptées aux exigences de performance, durabilité et qualité. Cependant, la recherche des matériaux les plus appropriés doit prendre en compte les ressources disponibles, les solutions fonctionnelles visées et aussi les contraintes esthétiques. [1]

Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles du composite ne sont réellement connues qu'après fabrication. [2]

Les composites commencent à faire leur chemin dans le bâtiments-travaux publics...etc. [3]

Le béton renforcé de fibres est l'un de ces matériaux, Les fibres augmentent la résistance mécanique du béton et sa résistance aux impacts et améliorent sa résistance au feu et réduisent son retrait plastique, avec ce matériau, les ingénieurs sont capables de projeter de nouvelles structures originales par leur design et leur conception, mais aussi par leurs capacités à résister aux diverses sollicitations extérieures [4].

Les caractéristiques de ce type de matériaux reposent sur la présence de fibres qui peuvent être de différentes natures : métalliques, synthétiques, naturelles ; dans cette mémoire, les mortiers et les bétons renforcé par les fibres métalliques et synthétiques ont été étudié.

L'influence des fibres apparait de différentes manières selon les auteurs : par leur capacité à contrôler les fissures, comme des absorbeurs d'énergie, par leur capacité à transférer les charges, par leur résistance en traction.

Ce mémoire comporte trois chapitres dont les grandes lignes sont résumées ci-après : Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique, il est divisé en deux partie :

- la première partie considère le matériau composite, tout d'abord on a défini qu'est ce qu'un matériau composite en signalant ses principales caractéristiques et son classification, on a fait aussi un rappel sur son

comportement mécanique, et puis on a cité les différents secteurs utilisateurs de matériau composite.

- la deuxième partie est réservée pour les composites à base de matrice cimentaire (mortier, béton), on a commencé par l'historique d'utilisation des fibres et quelques composites ciment-fibres, et puis on a étudié les types des fibres , ses avantages et désavantages et son processus de couture des fissures et enfin, on a terminé par l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibre et celles des bétons.

Dans le second chapitre, nous présenterons les caractéristiques des différents matériaux utilisés, pour la confection des mélanges. Ensuite, la composition des différents mélanges et le mode de préparation des différents mélanges (l'introduction de fibres, malaxage, conservation des éprouvettes,...) enfin, on fait un rappel sur les essais mécaniques effectués.

Finalement dans le troisième chapitre, les résultats du programme expérimental sur lequel s'appuie notre travail sont présentés, Les résultats expérimentaux seront analysés en fonction des dosages des fibres, les types des fibres, et l'effet de l'ajout de la fumée de silice.

Chapitre I



RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Matériaux composites

I.1.1 Introduction :

Dans ce premier chapitre, nous nous intéressons à l'étude bibliographique des matériaux composites et principalement aux bétons renforcés de fibres.

Les matériaux composites sont employés depuis très longtemps dans le génie civil. Le torchis en est un bel exemple : « terre grasse argileuse malaxée avec de la paille hachée ou du foin, utilisé pour lier les pierres d'un mur ou pour former le hourdis d'une construction en colombage, le béton fibré a aussi été utilisé depuis de nombreuses années avec succès et principalement pour des applications spécifiques telles que les éléments de préfabrication ou les dallages. [5]

Le mot « composite » lui-même laisse présager de la multitude de possibilités qui s'offre au « compositeur » pour créer le matériau qui correspondra exactement à son besoin, sans perdre de vue que dans un matériau composite c'est l'association des matériaux qui conduit à la performance qu'aucun d'eux ne pourrait donner seul. [6]

I.1.2 Définition :

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** (figure I.1) dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.[7]

Le matériau composite consiste dans le cas le plus général (figure I.2) d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue

est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant. [8]

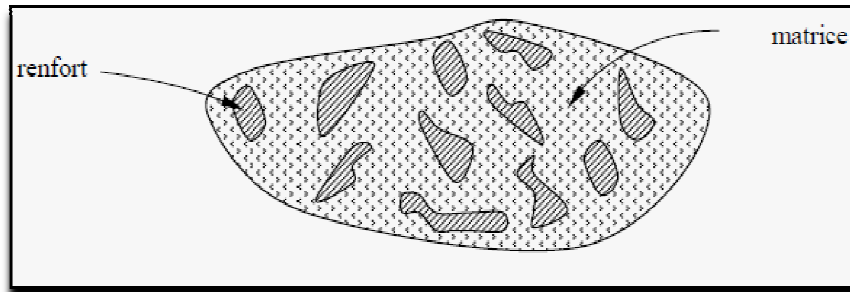


Fig. I.1 : Matériau composite [8]

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient la propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux traction, le comportement au feu...).

Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.[7]

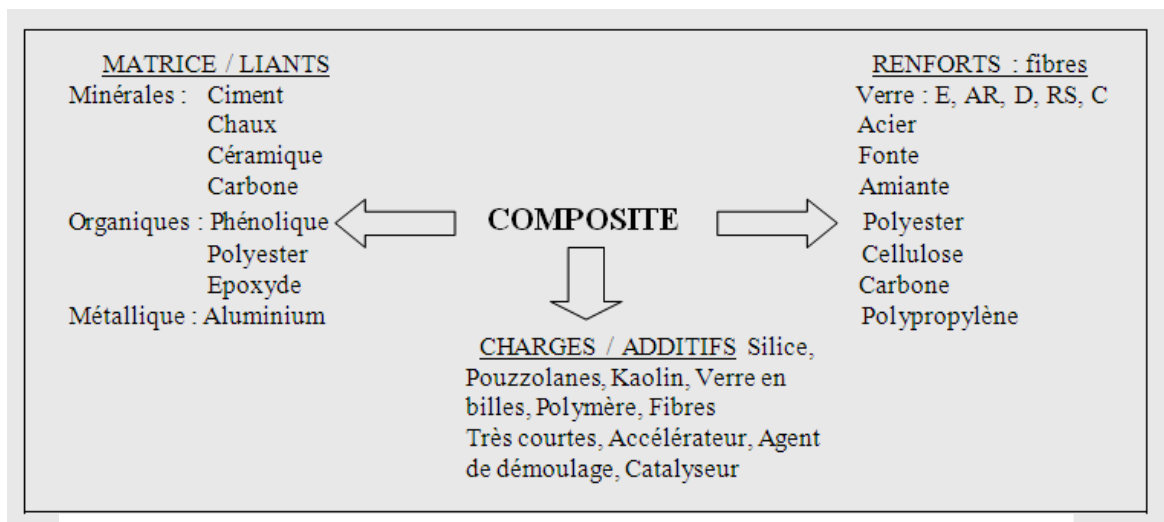


Fig. I.2 : Composition générale d'un matériau composite [9]

I.1.3 Fraction volumique et massique

Considérons un volume v_c de matériau composite, composé d'un volume v_f de fibres et d'un volume v_m de matrice.

La fraction volumique de fibres est : $V_f = v_f/v_c$

La fraction volumique de matrice est : $V_m = v_m/v_c$ Avec $V_m = 1 - V_f$

I.1.4 Fraction massique :

Les fractions massiques définies de la même manière à partir des masses p_f, p_c, p_m respectives de matériau composites, de fibres, de matrice.

La fraction massique de fibres est : $P_f = p_f/p_c$

La fraction massique de matrice est : $P_m = p_m/p_c$ Avec : $P_m = 1 - P_f$

I.1.5 Classification des matériaux composites :

I.1.5.1 Classification suivant la forme des constituants :

Les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

Les matériaux composites à fibres : se présentent sous diverses formes commerciales : sous forme linéique (fils, mèches, etc), sous forme de tissus surfacique (tissus simples, mats, etc.) sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc).

Les matériaux composites à particules : lorsque le renfort se trouve sous forme de particules, par opposition de fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Par exemple des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage.[8]

I.1.5.2 Classification suivant la nature des constituants :(voir la figure I.3.)

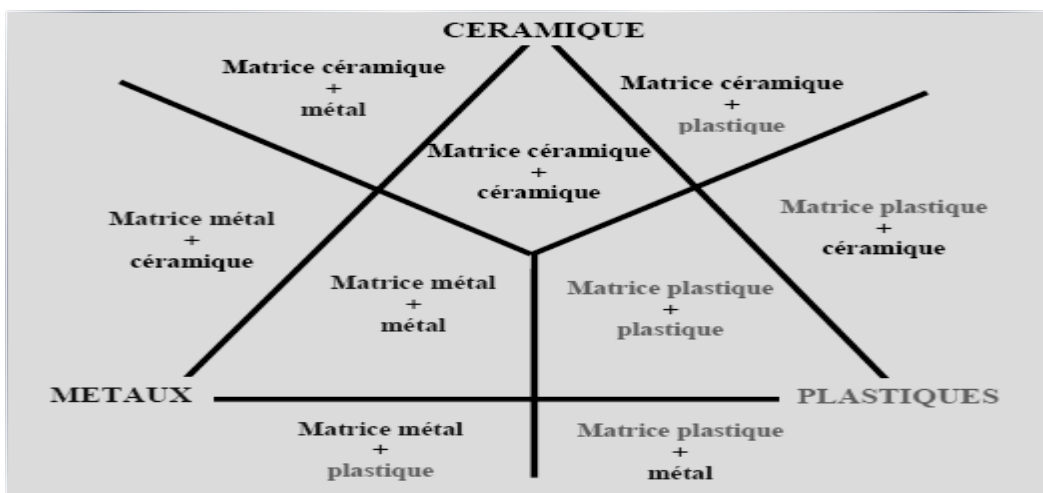


Fig. I.3 : Différents mélanges possibles pour la formation de matériaux composites à partir des trois types des matrices [10]

I.1.6 Loi des mélanges :

Considérons un matériau composite qui renferme une certaine fraction volumique de fibres continues et alignées dans une matrice ductile [11]. L'approche par la théorie des matériaux composites fut la première utilisée pour quantifier l'action des fibres sur la résistance du matériau est obtenue dans sa plus simple expression, en utilisant la loi des mélanges :

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f)$$

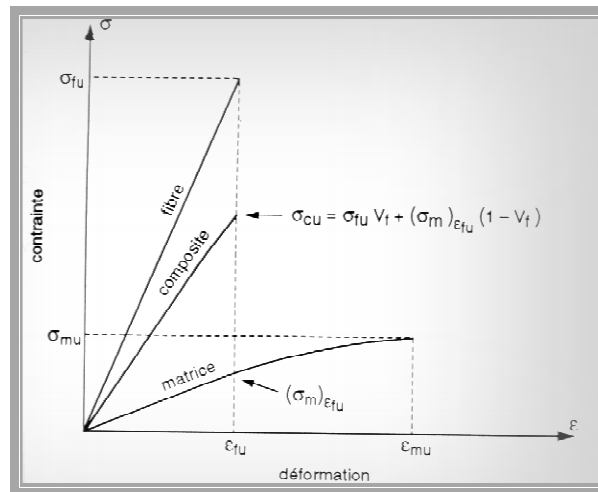


Fig I.4 Relation contrainte-déformation en traction pour les différents composants[10]

σ_c résistance du composite à la première fissuration.

σ_f contrainte de traction dans la fibre au moment de la première fissuration.

V_f pourcentage volumique des fibres.

σ_m résistance à la traction de la matrice.[10.12.13]

Pour les matériaux composites à matrice céramique, la règle des mélanges est rarement vérifiée, en effet, la valeur expérimentale de la résistance du composite à la première fissuration est bien souvent inférieure à celle qu'on prédit à partir de cette équation, alors que cette règle se vérifie en général pour les matériaux composites à matrices polymérique ou métallique. ce phénomène est dû au fait que ; dans les matériaux composites à matrice céramique ; la cohésion de l'interface fibre-renfort est faible et que, par conséquent, le transfert des contraintes est loin d'être parfait, cette faible cohésion est généralement

imputable à la trop grande différence qui existe entre les coefficients de dilatation thermique de la matrice et fibres. [14]

I.1.7 Endommagement des composites :

L'anisotropie des matériaux composites et la variation de leur résistance en fonction des directions et du signe des contraintes rendent complexe la prévision de leur rupture. Généralement on distingue trois mécanismes élémentaires d'endommagement dans un composite : soit la rupture de la fibre, la fissuration de la matrice et la décohésion de l'interface fibre-matrice, voir la figure I.4. La rupture finale du composite est le résultat de l'accumulation des divers mécanismes élémentaires [14]

I.1.7.1 Fissuration matricielle

Dans la matrice, la fissuration peut être transverse ou longitudinale. La première se produit lorsque la contrainte en traction dans la matrice atteint la contrainte de rupture de la matrice, alors que la seconde a lieu lorsque la contrainte de cisaillement dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture appelé « splitting » se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice. Dans le cas de composites industriels à fibres de verre, les performances à la rupture peuvent être limitées par une déformabilité trop faible de la matrice. Il apparaît donc nécessaire d'adapter au mieux les propriétés de la matrice à celles des fibres pour optimiser les performances à la rupture des matériaux composites.[8,10]

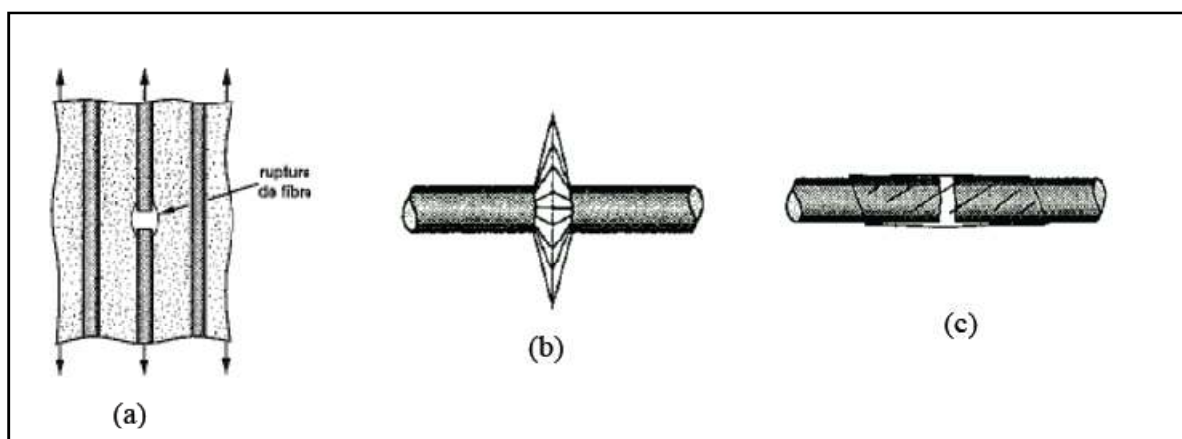


Fig. I.5 : Modes de rupture des matériaux composites : a- rupture de la fibre, b- rupture de la matrice, c- rupture de l'interface fibre-matrice. [3]

I.1.7.2 Rupture de fibre

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de fibre. Cela se produit en général lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture a lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement produit ne cesse de progresser à mesure que la contrainte est appliquée, et provoque ainsi la rupture de la matrice et autres fibres jusqu'à la rupture totale du matériau.[8,10]

I.1.7.3 Décohésion fibre-matrice

Dans la pratique, même après avoir choisi les constituantes fibres et matrice avec soin en les soumettant à des contrôles précis, l'interface issue de leur interaction ne peut être totalement maîtrisée par les efforts d'analyse et de prévision. Dans le cas particulier où les fibres sont discontinues, la zone inter faciale est le siège d'initiation de fissures et devient de ce fait critique à l'accumulation de l'endommagement. Cela est dû essentiellement à l'efficacité du transfert de charges à l'interface fibre-matrice ainsi qu'à la concentration des contraintes aux extrémités des fibres. Le comportement de l'interface fibre-matrice dépend essentiellement de ses propriétés mécaniques comparées à celles des fibres et de la matrice. Généralement la décohésion a lieu dans deux cas :

- lorsque la cohésion est inférieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de la matrice.
- lorsque l'adhérence fibre-matrice est faible : dans ce cas, la rupture de la matrice traverse les fibres sans qu'il y ait rupture de fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice, dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la rupture initiée, soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice.[8,10]

I.1.7.4 Délaminage

Dans le cas d'un stratifié ou multicouche, aux mécanismes élémentaires précédemment décrits s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches appelé rupture par délaminage. Ce type d'endommagement dépend de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposée. Le délaminage,

qui apparaît après la phase d'endommagement intra laminaire, commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette. Il correspond un fissuration qui a tendance à séparer les plis ou couche du composite.[8,10]

I.1.8 Exemples de secteurs d'application des composites

I.1.8 .1 Construction aéronautique

Les composites de haute performance ont été longtemps confinés dans l'aéronautique civile à des pièces de structure secondaire (habillage intérieur, volets), plus rarement primaire et jamais à la voilure, car il se posait deux difficultés :

- des coûts élevés par rapport à l'aluminium,
- des risques de délaminage les interdisant de vol sur les structures aérodynamiques chargées.
- Certains obstacles à l'utilisation massive des composites sont progressivement levés, en particulier par des acteurs étrangers, par exemple : dans le cadre du programme Advanced Composite Technology mené par la NASA et Boeing, mise au point d'un nouveau procédé permettant de développer des ailes en composites 20% moins chers qu'avec des matériaux conventionnels,
- développement de composites à mémoire de forme mené par British Aerospace et Daimler Benz,
- décision d'Airbus d'équiper les fuseaux de ses futurs A380 en technologie composite dite « glare »...[15]

I.1.8 .2 Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Mercedes..etc) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents.[15]

I.1.8 .3 Secteur du bâtiment

Mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (35 F/kg contre 18 F/kg pour l'acier et 6 F/kg pour le bois),

- d'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites,
- d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclable, durabilité).[15]

I.1.8 .4 Loisirs et sports

Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, développés notamment par Shape Technique et Ems Chimie (Suisse) ; ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes. C'est précisément en utilisant des nouveaux matériaux (skis moulés et non stratifiés) que Salomon est devenu Co-leader mondial du matériel de ski. [15]

I.2. Composites ciments-fibres

I.2.1 Historique :

Les fibres naturelles ont été utilisées depuis bien longtemps, pour renforcer des matériaux très divers : terre, plâtre, brique..., mais l'association avec le ciment, le mortier ou le béton est un procédé relativement récent. Le brevet sur l'amiante ciment date de 1902, les premiers emplois de fibres d'acier interviennent en 1923. Les fibres de verre, bien que connues depuis le début du siècle, n'ont fait l'objet d'essais d'incorporation au béton qu'à partir de 1950.

Aujourd'hui, le renforcement du mortier ou du béton par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites, dont les applications sont très variées, les composites « ciment fibres » et « béton fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation.[16]

I.2.2 Les composites ciments -fibres :

Il y a longtemps que l'on a cherché à améliorer la résistance à la traction des bétons de ciment (ou des mortiers) en y incorporant des fibres résistantes, les plaques de « fibre- ciment » sont un exemple bien connu de mortier de ciment

comprimé et armé de fibres d'amiante qui ont une forte résistance à la traction.[17]

Le béton (ou le mortier) est un matériau composite cimentaire sujet à des transformations permanentes dont la durée pourra s'étendre des mois, voire des années depuis l'instant de gâchage , il est généralement admis qu'après 28 jours, les caractéristiques mécaniques du composite cimentaire deviennent stable.[18]

Bien que l'usage de béton renforcé de fibres (BRF) soit de plus en plus répandu dans différentes applications... l'apport des fibres est relativement faible mis à part un meilleur comportement post fissuration en traction. Cependant, de nouvelles classes de bétons fibrés (BFHPet BFUP) présentent à la fois une résistance à la compression améliorée ainsi qu'un comportement écouissant et adoucissant remarquables en traction. [19]

Le béton fibré à ultra-hautes performances (BFUHP) est un nouveau matériau dont les caractéristiques mécaniques sont très supérieures à celles du béton ordinaire : sa résistance à la compression est environ 6 fois plus élevée et se rapproche ainsi de celle de l'acier alors que sa résistance à la traction est environ 4 fois plus élevée que celle d'un béton ordinaire. Malgré ces caractéristiques, l'ajout d'une grande quantité de fibres, facteur important dans l'augmentation du coût, ne permet qu'une augmentation très limitée de la résistance à la traction. Il assure par contre une augmentation considérable de la capacité de déformation du matériau, qui peut devenir déterminante dans des structures hyperstatiques de faibles dimensions. [20]

Le béton armé en est un autre, plus récent : les armatures d'acier constituent le renfort du mortier qui joue le rôle de matrice, Cependant quand on parle de matériaux composites dans le génie civil, on ne pense pas à ces matériaux mais plutôt aux composites constitués d'une matrice organique renforcé par des fibres [5]

I.2.3 Les fibres :

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques, on distingue trois grandes familles de fibres :

- Les fibres métalliques : acier , inox , fonte (amorphe)...

- Les fibres organiques : polypropylène , polyamide , acrylique , Kevlar;aramide ; carbone...etc.
- Les fibres minérales : verre , basalte , mica.

I. 2.3.1 Fibres de polypropylène

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques), elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté), elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170°C).

La fabrication du béton avec des fibres de polypropylène ne soulève pas de difficulté particulière. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précautions spécifiques lors du malaxage. L'optimisation de l'adjuvant permet de réaliser des bétons dont l'ouvrabilité est conservée. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylènes leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs.

De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène:

- dallages et aménagements urbains ;
- produits préfabriqués (parements) ;
- mortiers projetés ;
- enduits ;
- sculptures.

Les propriétés des fibres polypropylènes sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (meilleur comportement du béton frais) et les éléments préfabriqués (meilleure résistance mécanique au jeune âge), elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées.

Elles permettent de réaliser des parements esthétiques, avec des motifs très précis, et sont utilisées aussi pour la formulation des bétons projetés ou des mortiers de réparation.[16]



Fig. I.6 : les fibres de polypropylène. [21]

I.3.2.2 Fibres d'amiante

Les fibres d'amiante sont des silicates hydratés de magnésium extraites de roches appartenant aux familles de serpentines et des amphiboles.

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé, une excellente tenue au feu ,elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes.[13]

I.2.3.3Fibres métalliques

Les fibres métalliques, notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton.Les recherches visant à améliorer l'adhérence aubéton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton :

- fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc.

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur solo sur pieux), pour la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement en béton), pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.[16]

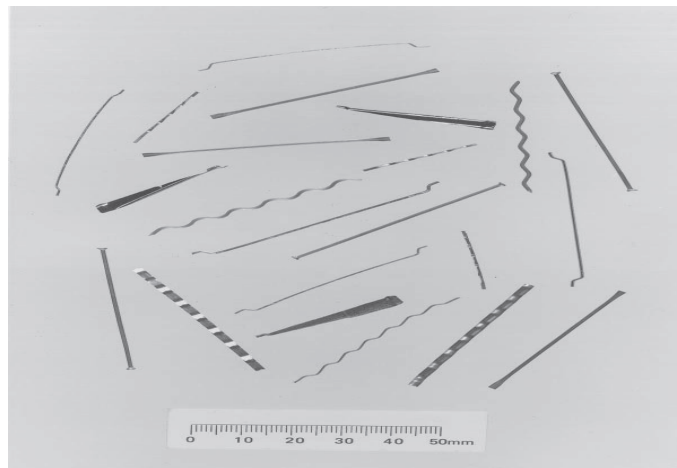


Fig. I.7 :les fibres d'acier. [21]

1.2.3.4Fibres de carbone :

Elles peuvent être réalisées par carbonisation de fibres poly acrylonitriles(PAN) ou de brai. Le précurseur est oxydé à une température de l'ordre de 300 ° C puis ensuite chauffé en atmosphère neutre. Les propriétés mécaniques dépendent de la température finale de fabrication. Le module d'Young augmente régulièrement avec la température tandis que la résistance en traction atteint un pic pour une température de l'ordre de 1 500 °C, puis décroît si l'on continue à augmenter la température de fabrication.

On obtient ainsi des fibres haute résistance, haut module et même très haut module. Il existe sur le marché des fibres de première génération (apparues dans les années 1970) et

des fibres de deuxième génération (apparues autour de 1984) qui présentent des résistances très supérieures à celles des fibres de première génération. [22]

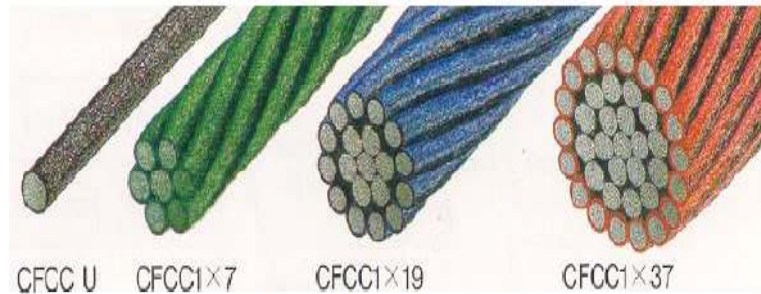


Fig. I.8 : Câble mixte en fibre de carbone [23]

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- sa faible densité ;
- ses propriétés mécaniques longitudinales ;
- l'absence de corrosion ;
- sa très bonne tenue à la fatigue ;
- sa facilité de manipulation.

Les principaux inconvénients sont en contrepartie :

- une anisotropie très marquée ;
- un comportement à la rupture de type fragile des composites ;
- un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.[24]

I.2.3.5 Fibres de verre :

Elles sont fabriquées par étirage rapide de baguettes de verre de quelques dixièmes de millimètre de diamètre, sortant d'une filière chauffée par effet Joule. L'étirage peut être produit suivant les deux méthodes suivantes :

- le **procédé mécanique**, dénommé *Silienne*, dans lequel l'étirage est réalisé par la traction due à l'enroulement du fil sur une broche tournant à grande vitesse ; on obtient des fils continus .

- le **procédé pneumatique**, dénommé *Verranne*, dans lequel l'étirage est produit par entraînement des fibres sous l'action d'un jet d'air sous pression, on obtient des fibres de faible longueur.

Seul le premier procédé permet d'obtenir des matériaux présentant des caractéristiques mécaniques élevées. Il existe, dans chaque procédé, suivant les compositions chimiques, plusieurs types de verre dont les propriétés caractéristiques sont les suivantes :

- **verre E** : usage général, bonnes propriétés électriques ;
- **verre D** : hautes propriétés diélectriques ;
- **verre C** : bonne résistance chimique ;
- **verres R ou S** : haute résistance mécanique.

La fibre de verre R ou S a une résistance mécanique élevée et une rigidité moyenne. Sa densité relativement élevée par rapport aux autres fibres explique sa position médiane lorsqu'on la compare du point de vue des propriétés spécifiques aux autres fibres (figure I.9). Il ne faut cependant pas oublier que c'est la fibre la moins chère du marché. [22]



Fig .I.9 : tissus en fibre de verre

I.2.3.6 Fibres naturelles

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

1. les fibres végétales qui comprennent :
 - les fibres provenant des poils séminaux de gaines (coton kapok) ;
 - les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie)
 - les fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco).

2. les fibres animales qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et sécrétions telle que la soie ;
3. les fibres minérales telles que le basalte.

Elles constituent une alternative aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Néanmoins leurs propriétés doivent être encore améliorées. elles présenteraient, toutefois, de nombreux avantages :

- des propriétés mécaniques proches de celles des fibres de verre (module d'Young) ;
- un recyclage facile (combustion).

En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel :

- une méthode de mise en œuvre difficilement reproductible (non industrielle)
- des propriétés physiques non reproductibles ;
- la quantité et la qualité des fibres dépendent de l'environnement et de l'humidité ;
- une reprise en eau importante : 8 ou 10 % du taux d'humidité ;
- une calibration difficile.[25]

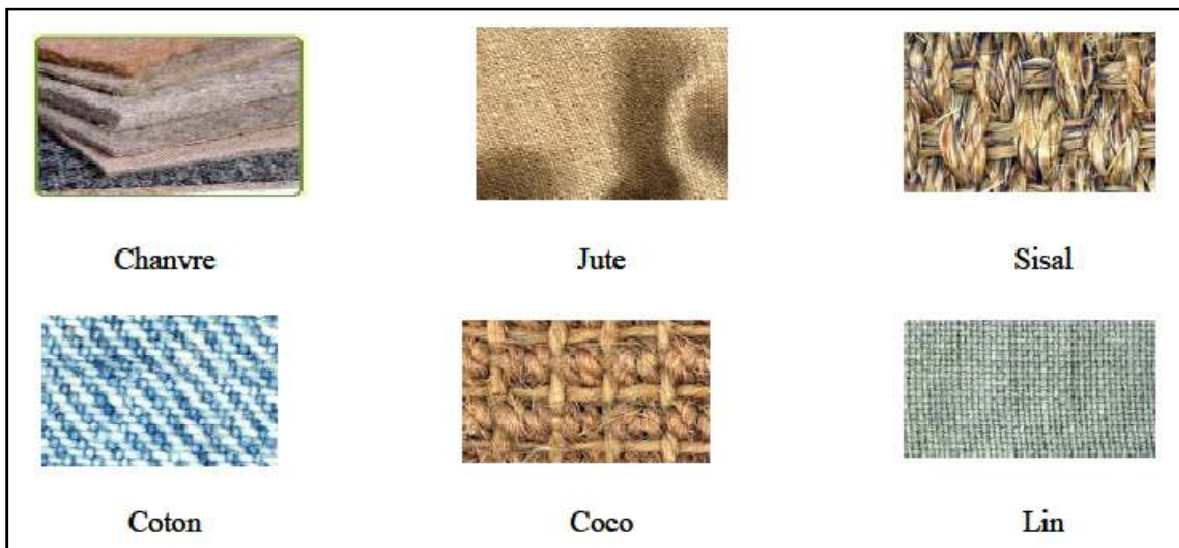


Fig. I.10 : quelques exemples de tissus de fibres végétales [25]

I.2.4 Caractéristiques des renforts fibreux :

Les renforts fibreux sont caractérisés par leur forme et leur nature dont dépendent

aux grandeurs suivantes : coefficient de dilatation mécanique souple, élasticité, déformation à la rupture, adhésion plus ou moins importante à la pâte de ciment, et neutralité vis à vis du milieu. Le tableau 1 donne les caractéristiques moyennes des fibres les plus utilisées.

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton ou de mortier, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau. L'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton les valeurs de ces rapports sont généralement comprises entre 100 et 200, car les fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité. [26]

Tableau.1 : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées. [26]

Fibres	Diamètre (μm)	Long (mm)	densité	Rt (Mpa)	E (10^3 Mpa)	Allongement à La rupture en %	Coeff. De Dilatation (μ/m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5 – 500	20 – 80	7.8	1000- 3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 x2600 de section	50 – 60	7.8	2500	140	1		1500
Verre	5 – 20	40 – 70	2.6	1500- 3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10 – 200	25 – 75	0.9	400- 750	5-10	15-25	90	150
Polyester			1.4	700- 850	8	11-13		
Amiante	0.02 – 20	5	2.5 – 3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5 – 9	Variable	1.7 – 2	2000- 3000	250- 400	0.5-1.5		400- 1500
sisal	10 - 50	1.50	1.5		130	3		

1.2.5 Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la

résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure I-11.

- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes. [13,27,28]

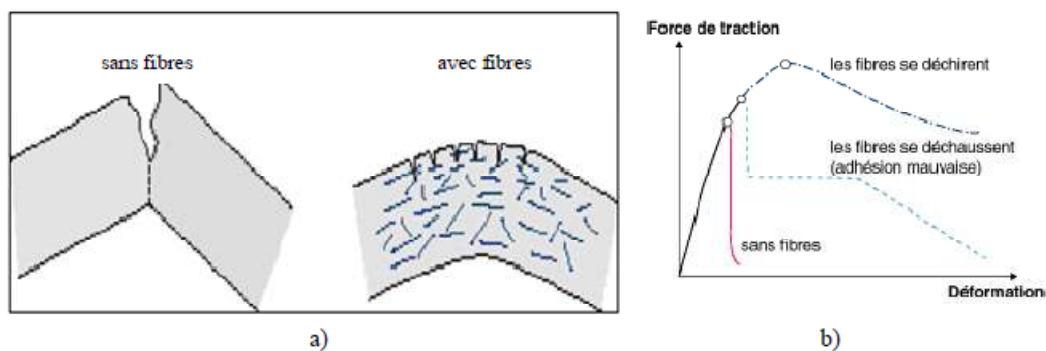


Fig. I.11 :Illustration de l'apport du renfort par des fibres[28]

Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives. selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à : la cohésion du béton frais

- la déformabilité avant rupture.[29]
- la résistance à la traction par flexion.[16]
- la ductilité et la résistance post fissuration. [30]
- la résistance aux chocs. [31]
- la résistance à la fatigue
- la résistance à l'usure
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges[4]
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures [32]
- la tenue au feu[33,34,35]
- la résistance à l'abrasion [36]

1.2.6 Désavantages des fibres

- Coût relativement élevé du produit de base (jusqu'a 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique).
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton-composite.
- Manque de ductilité.
- Absence de normes de design. [16]
- un module d'élasticité relativement faible sauf pour les fibres de carbone.[28]
- absence de déformation plastique perte de résistance sous charges retenues [28]
- réactions des fibres de verre avec les alcalis [28]

1.2.7 Domaines d'applications des composites cimentaires :

En effet les besoins sont multiples ,la réparation de structures endommagés par accident ou par vieillissement, mais aussi le renforcement d'ouvrage qui changent de fonction : un pont autoroutier auquel on ajoute une voie, un plancher doit recevoir une machine plus lourde que prévu, un bâtiment qui subit des modifications. De plus l'évolution des réglementations antisismiques, ou de gestion des risques d'explosion, ouvre aussi des perspectives aux composites sans compter le renforcement des structures mal dimensionnées

Les ouvrages réalisés en composites sont essentiellement des ponts et passerelles dont les poutres, tabliers, et câbles peuvent être fabriqués en résine renforcée de fibre de carbone et de verre. A titre d'exemples, le danois Fiberline Composites a construit récemment près de Dresde (Allemagne) un pont routier entièrement en polymère renforcé de fibre de verre , le principal atout de cette solution, par rapport au béton et à l'acier :la rapidité de la mise en place de l'ouvrage et les faibles couts de maintenance. [37]

Tableau I.2 : Intérêts apportés par l'ajout de fibres[27,28]

APPLICATIONS	INTERETS APPORTES PAR L'AJOUT DES FIBRES
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	- Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration

Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations ...)	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	- Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries souterrains	- Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé - Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement

1.2.8 Durabilité des bétons de fibres

Quand on parle de durabilité des bétons de fibres, il faut se placer à deux niveaux (deux échelles) : celui du matériau et celui de la structure.

a) Le premier aspect à évoquer concerne bien sûr le problème de la corrosion des fibres (échelle matériau). Pour ce qui concerne les fibres synthétiques, à l'exception de certaines fibres d'aramide, il n'y a pas de problème de durabilité de la fibre dans le béton. Pour ce qui concerne les fibres métalliques, la corrosion des fibres peut bien évidemment survenir. Le retour d'expérience et la recherche concluent sur deux points : la corrosion superficielle des fibres peut provoquer des salissures à la surface des structures exposées et ne génère aucune pathologie, ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures les utilisant. Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- en optimisant la formulation du béton fibré ;

- en utilisant des coffrages non métalliques ou munis d'une "peau interne" (tissu synthétique, par exemple) ;

- en utilisant des fibres galvanisées.

b) Le second aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés concerne la tenue au feu des structures. Les fibres métalliques n'apportent pas plus de déterminant dans la tenue au feu des structures. Ce que l'on peut simplement souligner est qu'une structure en béton de fibres métalliques se comporte plutôt mieux vis-à-vis du feu qu'une structure en béton armé classique (moins d'éclatements). Au contraire, certaines fibres synthétiques, notamment les microfibrilles de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique. Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu (évaporation de l'eau présente dans le béton).

c) Pour ce qui concerne la durabilité des structures en béton fibré, un dernier point important concerne le maintien dans le temps d'une fonction demandée à une structure donnée à l'exemple d'un revêtement quelconque en béton fibré à qui on demande d'assurer une fonction d'étanchéité (vis-à-vis des infiltrations d'eau, par exemple). Du fait du fluage des fibres synthétiques, évoqué précédemment, cette fonction assurée par une structure en béton de fibres synthétiques, peut ne plus l'être quelque temps plus tard. Il s'agit d'un problème pour lequel les bétons de fibres métalliques ne sont pas concernés.

Enfin, dans le cas d'éléments préfabriqués manu portables, ou dans celui des structures susceptibles d'être en contact direct avec les usagers, des problèmes de sécurité peuvent se poser, s'agissant de bétons de fibres métalliques. Ce phénomène concerne surtout les bétons de fibres dont les fibres sont de petits diamètres, c'est-à-dire inférieures ou égales à 0,25 mm. En effet, on ne peut jamais garantir à 100 % qu'aucune fibre métallique n'affleurerà à la surface de la structure, ce qui peut occasionner des blessures. Des solutions techniques existent pour pallier cet inconvénient, solutions dont il ne faut pas faire l'impasse. Ces problèmes de blessure occasionnés par des fibres n'existent pas avec les fibres synthétiques.[38]

1.2.9 Réparation par matériaux composites

De nos jours, bon nombre de structures en béton armé ayant été exposées à des environnements agressifs présentent des problèmes de durabilité et risquent de ne pas atteindre leur durée de vie utile théorique. La corrosion induite par les chlorures et/ou la carbonatation est la principale cause de détérioration des structures de béton armé. Les coûts des réparations et des restaurations effectuées aux USA, au Canada et dans la plupart des pays européens représentent un fort pourcentage des dépenses reliées aux infrastructures. En Europe par exemple, le coût annuel des réparations dues à la corrosion des barres d'acier d'armature est estimé à un milliard d'Euros[34]

Depuis que le béton armé existe, la présence et l'ouverture de fissures de flexion sont considérées comme préjudiciables vis-à-vis de la corrosion, car elles sont des chemins d'accès préférentiels aux ions agressifs. [39]

L'utilisation de matériaux composites FRP associée à des colles sur des surfaces tendues ou sur des surfaces latérales est un moyen très efficace pour renforcer les poutres en béton armé, plus particulièrement pour les poutres faiblement armées. Le collage du composite sur des surfaces tendues augmente la résistance ultime des poutres renforcées et en diminuant la flèche des structures, il augmente également leur raideur et limitant ainsi la propagation des fissures. Ce phénomène permet de diminuer la corrosion des armatures et d'améliorer la durabilité des structures[40]

Différentes technologies de réparation et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années. Le traitement du béton peut faire l'objet d'opérations de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique ou polymérique après traitement de la poutre dégradée. Les zones fissurées font l'objet d'injection de polymères (Figure .I.12). Les différentes techniques de renforcement structurel correspondent soit à la projection de béton fibré ou non fibré, soit au collage de tôles d'acier suivant le procédé l'Hermite (Figure. I.13), soit à l'application d'une précontrainte additionnelle par câbles métalliques ou composites. [39]

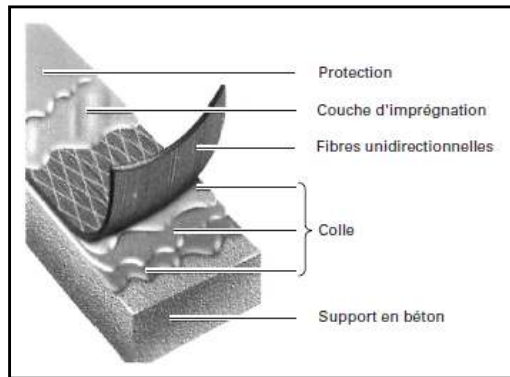


Fig.I.12 : Conception du système multicouche[41]

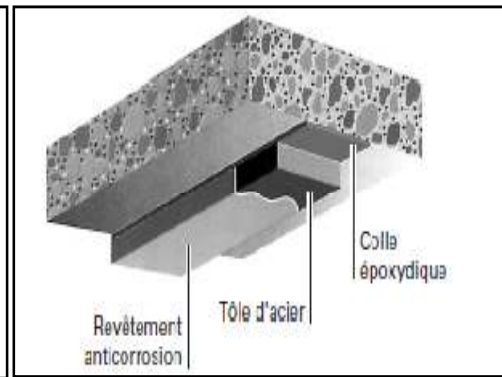


Fig. I.13 : Application de plats métalliques selon le procédé l'Hermitte[41]

I.3 Comportement mécanique des composites à base de matrice cimentaire :

I.3.1 Comportement à la compression:

I.3.1.1 matrice non renforcée:

Le béton est un matériau hétérogène constitué d'une matrice en ciment et d'inclusions de granulats ou agrégats (sables, graviers, cailloux) dont la répartition et la géométrie ne sont pas connues a priori et présentent souvent une dispersion importante. A cette hétérogénéité de composition vient s'ajouter une hétérogénéité dite structurelle. Elle consiste en l'existence de défauts initiaux (microfissures) au sein de la microstructure. La plupart de ces défauts se situe à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment, cette interface constituant le lien le plus faible du matériau ,des microfissures peuvent également être générées dans le ciment par différents facteurs, tels que : le retrait (diminution du volume apparent de la matière) hydraulique engendré par une évaporation d'eau, le retrait thermique engendré par une variation de température ou une consolidation incomplète du ciment entraînant la formation de microcavités. Lorsque cette structure est soumise à une sollicitation, des microfissures supplémentaires peuvent se former suite à des concentrations de contraintes de tension isolées dues à des déformations incompatibles entre les granulats et le ciment. [42]

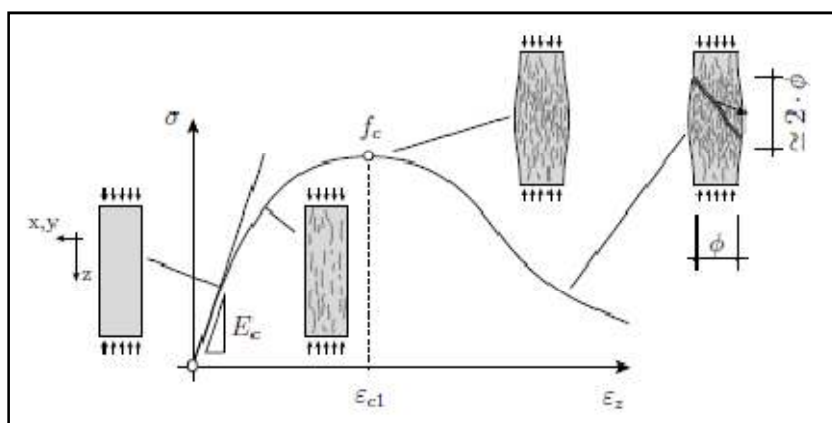


Fig. I.14 : Représentation qualitative du comportement d'un cylindre en béton soumis à un effort de compression uni axial[42]

le comportement d'un cylindre en béton soumis à un effort de compression centrée est présentée sur la figure I.14. Pour un béton ordinaire, le comportement est linéaire élastique jusqu'à environ 30 % de la résistance à la compression. Pour des contraintes plus importantes, des microfissures se créent ou se propagent à partir des micro-défauts préexistants, ces fissures tendent à s'orienter parallèlement à l'effort de compression appliqué, Jusqu'à une contrainte d'environ 70 - 75 % de la résistance à la compression, la propagation des fissures est stable et produit uniquement un endommagement local et une perte de rigidité globale de l'échantillon. Pour des contraintes supérieures, les fissures commencent à interagir. La rupture est atteinte par formation d'un mécanisme global dont la typologie dépend des propriétés du matériau ainsi que de la géométrie et des conditions de bord du spécimen [43]

Le comportement du béton en compression uni-axiale peut être divisé en deux zones: la partie ascendante de la courbe contrainte-déformation décrit le comportement du béton non fissuré (présence uniquement de microfissures non visibles à l'œil nu) alors que la partie d'adoucissement est associée au comportement du béton fissuré (les fissures sont observables à l'œil nu).[42]

I.3.1.1 Matrice renforcée :

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences.

Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression, dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : celui en premier de maintenir les fissures ce qui favorable pour la phase post pic, et celui en second de créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer à l'endommagement et donc limiter la charge maximale. [26]

D'après Boulekbache et al[44,45] et Bentalha [46] : les fibres travaillent efficacement quand elles sont soumises à la traction, elles empêchent ainsi la propagation des fissures. Lors de l'écrasement sous compression, ce rôle est très réduit voir inexistant en phase de pré fissuration, induisant même des défauts supplémentaires dans la matrice pouvant conduire à une faible compacité.

Le comportement pré-pic est de ce fait logiquement quasi identique avec ou sans fibres. En revanche, la présence des fibres améliore le comportement post-pic et réduit la pente descendante de la courbe contrainte-déformation (Figure I.15). Cette observation est particulièrement spectaculaire lorsqu'il s'agit du BHP fibré.

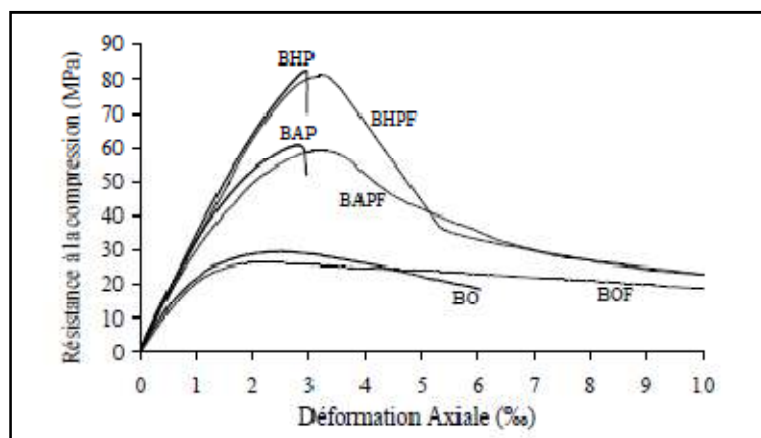


Fig. I.15 : Effet des fibres sur le comportement en compression selon le type de béton[44]

D'après Ezziane et al[33]La figure 1 montre que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression et que la résistance n'est que légèrement affectée comme l'ont montré un certain nombre d'études. D'autres auteurs sont en désaccord et parlent soit d'une augmentation de 15 à 20 % ou quelques fois d'une légère diminution .

Les fibres ne jouent un rôle significatif qu'après la rupture de la matrice cimentaire : l'énergie dissipée, caractérisée par l'aire sous la courbe, est très nettement augmentée

(Fig.I.16). Il est important de remarquer que le module d'élasticité reste pratiquement inchangé.

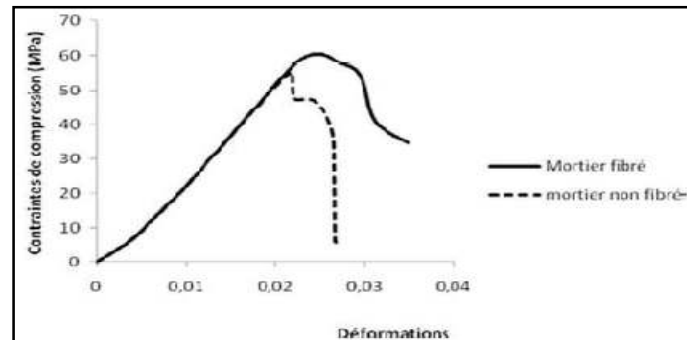


Fig.I.16 : Courbes contraintes-déformations en compression de mortiers de références

I.3.2 Comportement à la traction :

I.3.2.1 Matrice non renforcée :

La courbe contrainte-déformation du béton obtenue en traction unia-axiale (figure 3.3) est similaire à celle décrite pour la compression, mis à part le fait que la résistance limite en traction f_t est nettement plus faible que celle en compression ($f_t=0.1f_c$). La courbe est linéaire jusqu'à environ 75% de sa résistance limite de traction f_t , les microfissures s'initient à se développer dans la région qui précède la résistance au pic et qu'elles s'agrandissent plus rapidement que lors du test de compression et par conséquent la rupture survient plus tôt, des tests expérimentaux de traction directe effectués sur des éprouvettes en béton ont montré que, juste avant le pic, une décohésion des granulats les plus importants apparaissait et que les fissures nées de cette décohésion unie ensuite avec les microfissures existantes pour former une macro-fissure continue. De plus, les résultats révèlent la présence de nombreux grains reliant les surfaces de la fissure, ce qui explique la branche d'adoucissement de la courbe contrainte-déformation. La ruine des éprouvettes apparaît lors de la rupture de ces grains.

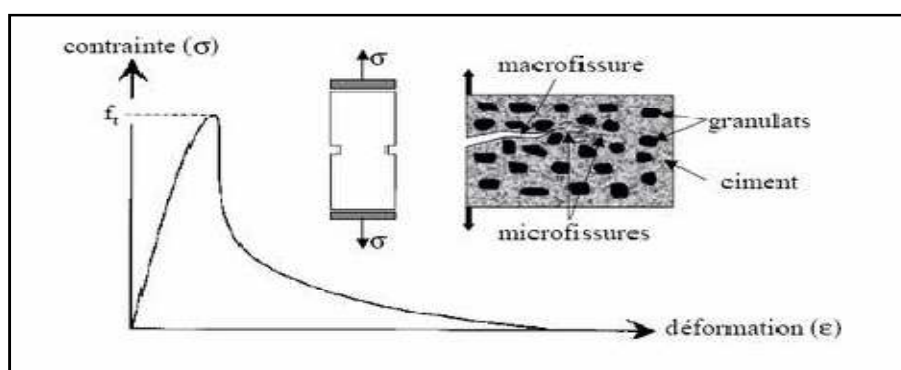


Fig.I.17: Comportement du béton en traction uni-axiale[42]

I.3.2.2 Matrice renforcée :

L'essai de traction par flexion réalisé sur prismes est certainement le plus significatif du comportement du béton de fibres. Cependant on constate que le résultat de l'essai dépend entre autre de la dimension de l'éprouvette et du mode de chargement [26]

D'après Ezziane et al[33]L'ajout des fibres dans le mortier a des conséquences plus marquées sur la résistance en traction (Fig.I.18). On remarque que, avec l'addition de 0,58% de fibres d'acier, la résistance à la flexion augmente de 25 % par rapport à celle du mortier non renforcé.

Les résultats font également apparaître un comportement ductile du mortier fibré. La présence de fibres ductiles dans la matrice modifie considérablement le comportement fragile en limitant le phénomène de propagation rapide et instable de la rupture. Leur présence rend non seulement la propagation de la fissure plus lente et progressive avec l'accroissement de la charge, mais autorise un transfert de contrainte à travers les lèvres. Ceci permet au composite d'avoir une résistance post fissuration et de supporter des déformations beaucoup plus grandes que la matrice seule.

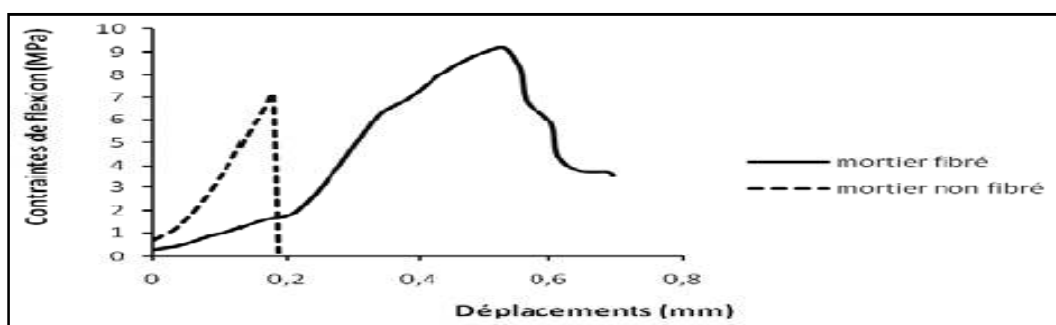


Fig.I.18 : Courbes contraintes-déformations en traction par flexion 4 points des mortiers de référence[33]

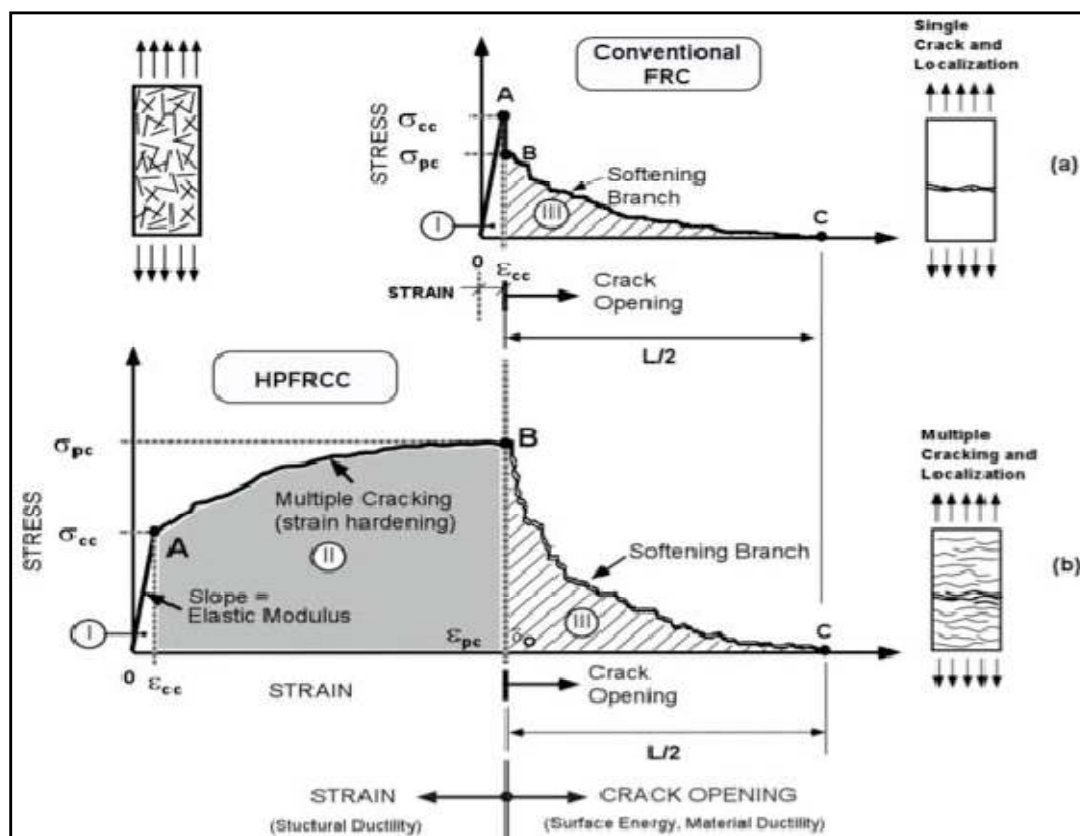


Fig.I.19 : Comportements en traction de bétons renforcés de fibres (FRC : béton fibré conventionnel, HPFRC : béton fibré haute performance[47,48]

Les nombreuses études menées sur les bétons renforcés de fibres ont permis à Naaman [31] d'illustrer le comportement des bétons en traction comme le montre la Figure I.19

Les fibres métalliques favorisent la multi fissuration et retardent l'amorçage d'une unique fissure. Le béton peut alors présenter un fort taux d'écrouissage contrairement au comportement généralement adoucissant des bétons. Sous sollicitation, l'énergie nécessaire à l'ouverture d'une fissure sera beaucoup plus grande que dans le cas des bétons non renforcés.[49]

I.3.3 Comportement en flexion :

Concernant le comportement en flexion (Fig. I.20) d'après les travaux de Sedan [50] présente l'évolution de la force appliquée en fonction du déplacement de traverse au centre de l'éprouvette pour un échantillon de ciment pur et pour une éprouvette a fraction volumique de fibres égale a 16% ,deux types de comportement sont observés. Le premier (1) correspond à l'échantillon de ciment pur et se caractérise par un comportement linéaire et fragile avant rupture. Le second (2), relatif au ciment renforcé, se traduit par un

comportement linéaire jusqu'à la reprise de charge, puis par l'apparition d'une non linéarité marquée jusqu'au pic suivi d'un comportement adoucissant post-pic.

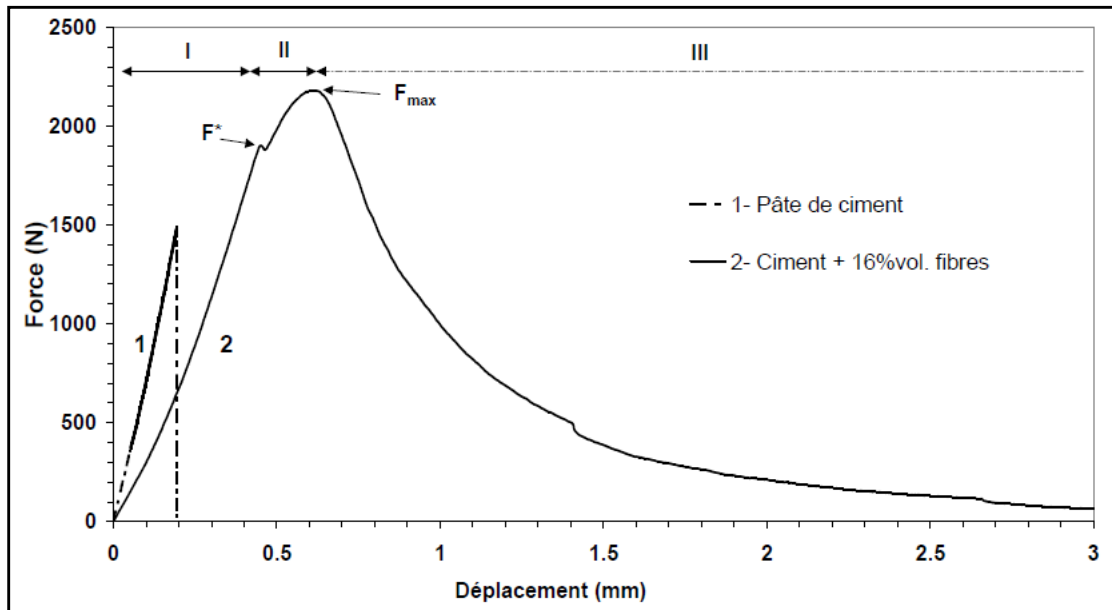


Fig. I.20: Courbes du comportement typique d'un échantillon (1) de ciment pur et (2) d'un composite ciment/fibres en flexion 3 points

Pour le composite, on distingue trois régions principales et deux points caractéristiques : F^* à partir duquel on observe une légère chute de charge correspondant probablement au point de premier endommagement macroscopique du composite, et F_{max} qui correspond à la force maximale appliquée.

La phase I [O- F^*] est celle où le comportement du matériau est quasi-linéaire, elle s'apparente au comportement du ciment pur, ce qui traduit une charge supportée majoritairement par la matrice qui est progressivement transférée aux fibres.

La région II, à partir de F^* , caractérise la première chute de charge, certes assez faible, et l'apparition d'un comportement non linéaire suivant une reprise de la charge par les fibres. Cette reprise de charge traduit probablement une bonne adhésion à l'interface fibre-matrice. Cependant, la non-linéarité observée dans l'évolution de la force traduit très probablement un endommagement qui progresse jusqu'à F_{max} . Le rôle des fibres dans cette partie consiste principalement à limiter la progression de la macro fissure et un effet de pontage par les fibres en arrière de la fissure est à privilégier. À l'issue de cette phase II, la force maximale F_{max} appliquée à l'échantillon est atteinte.

C'est le **début de la région III**. Cette phase est intéressante à plusieurs titres, car, contrairement à l'échantillon de ciment pur montrant une chute brutale de la charge, le composite présente une chute de charge contrôlée. Cette dernière peut être associée à une rupture progressive des interfaces fibres-matrice suivie d'un déchaussement, et d'une rupture des fibres.

Conclusion

La technologie de la construction se développe, s'accroît le besoin en matériaux dont les caractéristiques et la méthodologie d'emploi sont mieux adaptées aux exigences de performance, durabilité et qualité. Cependant, la recherche des matériaux les plus appropriés doit prendre en compte les ressources disponibles, les solutions fonctionnelles visées et aussi les contraintes esthétiques par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion

Le béton (ou le mortier) est un matériau composite cimentaire sujet à des transformations permanentes dont la durée pourra s'étendre des mois, voire des années depuis l'instant de gâchage, il est généralement admis qu'après 28 jours, les caractéristiques mécaniques du composite cimentaire deviennent stable.

Bien que l'usage de béton renforcé de fibres (BRF) soit de plus en plus répandu dans différentes applications, l'apport des fibres est relativement faible mis à part un meilleur comportement post fissuration en traction. Cependant, de nouvelles classes de bétons fibrés (BFHP et BFUP) présentent à la fois une résistance à la compression améliorée ainsi qu'un comportement écouissant et adoucissant remarquables en traction.

Chapitre II

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES



CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISÉS

II.1 Introduction :

Ce chapitre est réservé dans sa première partie à la présentation des différents matériaux mis en œuvre pour confectionner nos mélanges, où il est nécessaire de connaître les caractéristiques physico-chimiques et mécanique des constituants de mortier et de béton renforcé de fibre. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté la composition des différents mélanges et le mode de préparation des différents types d'éprouvette et enfin nous avons présenté les différents essais réalisés.

II.2 Matériaux utilisés :

II.2.1 Ciment :

Le ciment utilisé est le ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5 provenant de la cimenterie de Aïn-Touta (wilaya de Batna). Les compositions chimique et minéralogique et les caractéristiques physiques et mécaniques ont été effectuées au niveau du laboratoire de la cimenterie de Aïn-Touta (Batna) selon la norme NF EN 196-2. Les résultats sont donnés sur les tableaux II.1 et II.2 et II.3

Tableau II.1: Composition chimique de ciment

Composition chimique (%) :												
CPJ-CEM II/A 42.5	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	K ₂ O	Na ₂ O	Chaux libre	Perte au feu	Résidu insoluble
	20.34	5.37	3.00	61.69	1.80	2.20	0.027	0.76	0.14	0.97	5.03	1.12

TableauII.2 : Composition minéralogique du ciment

Composition minéralogique (%)				
Type de ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CPJ-CEM II/A 42.5	58.3	14.6	8.7	11.26

TableauII. 3 : Caractéristique du ciment

Caractéristiques	Nomination	CPJ-CEM II/A 42.5
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1.215
Masse volumique absolue (g/cm ³)		3.150
Surface spécifique (Blaine)(cm ² /g)		3371
Temps de début de prise (heures)		2h : 03
Temps de fin de prise (heures)		3h : 00
La résistance à la compressionà 28 jours(MPA)		47

II.2.2 Granulats :

II.2.2.1 Sable :

Le sable utilisé dans notre travail provient de la région de Lioua (Biskra). Nous avons aussi dérivé un **sable reconstitué** dont la composition granulométrique est indiquée sur le tableauII.4

TableauII.4 : La composition granulométrique du sable reconstitué

La fraction	La quantité de sable (g)
0 / 0.5	450
0.5 / 1	450
1 / 2	450

II.2.2.1.1 Sable de Lioua

A- **Analyse granulométrique** : les résultats de l'analyse granulométrique pour le sable de Lioua sont présentés sur le tableau II.5.

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable de Lioua 0/5

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0.5	0	0	100
2.5	100	125	12.5	87.5
1.25	100	199	19.9	80.1
0.63	430	629	62.9	37.1
0.315	278	907	90.7	9.3
0.160	78	985	98.5	1.5
0.080	13	991	99.1	0.1
fillers	1	1000	100	0

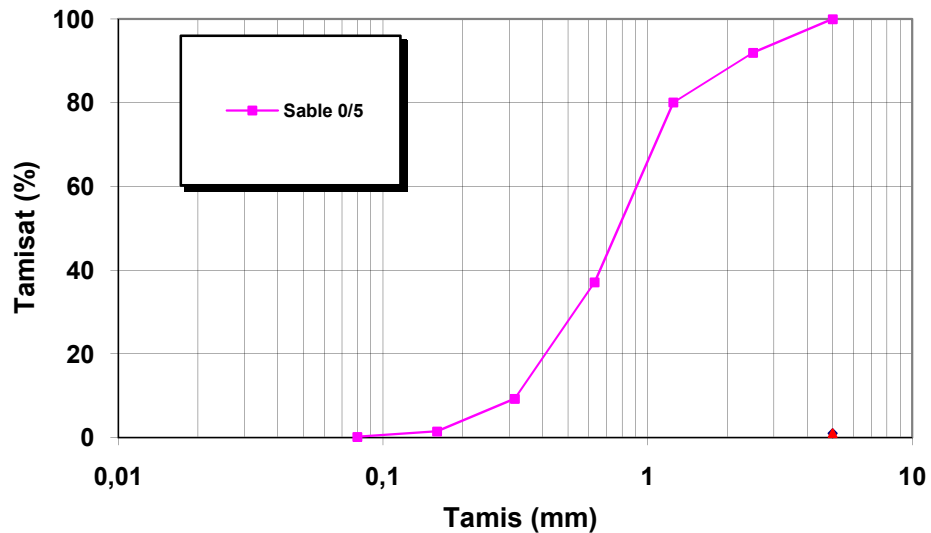


Fig. II.1 : Courbe granulométrique du sable de Lioua

B- Propriétés physiques de sable de Lioua :

Masse volumique apparente = 1680 kg/m^3

Masse volumique absolue = 2500 kg/m^3

Module de finesse = 2,67 (la granularité du sable est admissible).

Equivalent de sable : ES visuel = 77.47% > 75%. (Sable propre).

II.2.2.1.2 Sable reconstitué (normal):

A- Analyse granulométrique : les résultats de l'analyse granulométrique pour le sable reconstitué sont présentés sur les tableau II.6.

Tableau II. 6 : Analyse granulométrique du sable reconstitué

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamises cumulés (%)
2	0	0	0	100
1	450	450	34	66
0.5	450	900	66	34
< 0.5	450	1350	100	0

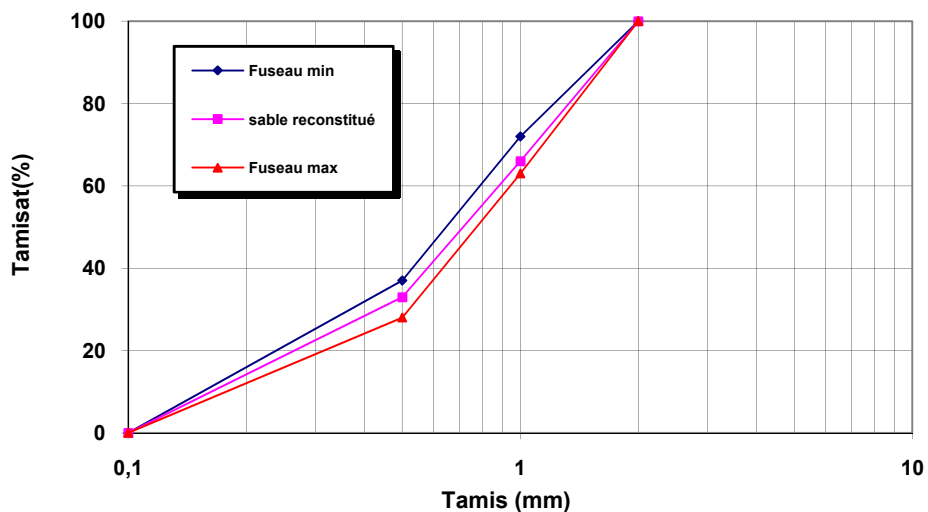


Fig. II.2 : Courbe granulométrique du sable reconstitué

On observe que la courbe granulométrique de sable reconstitué se situe à l'intérieur du fuseau indiqué sur la figure II.2 , donc on peut le considérer comme un sable normal.

B- Propriétés physiques de sable

Masse volumique apparente = 1615 kg/m^3

Masse volumique absolue = 2308 kg/m^3

Equivalent de sable : ES visuel = $76.57 > 75 \%$ (sable propre).

II.2.2.2 Gravier :

Les graviers provenant de la région de Ain-Touta (Wilaya de Batna) utilisés dans notre travail sont de fractions suivantes : 3/8 et 7/15.

A- Analyse granulométrique :

les résultats de l'analyse granulométrique pour les deux types sont présentés aux tableaux II.7 et II.8.

Tableau II.7 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
10	0	0	0	100
8	53	53	3.5	96.5
6.3	305	358	23.9	76.1
5	328	686	45.7	54.3
3.15	605	1291	86	14
2.5	202	1493	99.5	0.5
1.25	7	1500	100	0

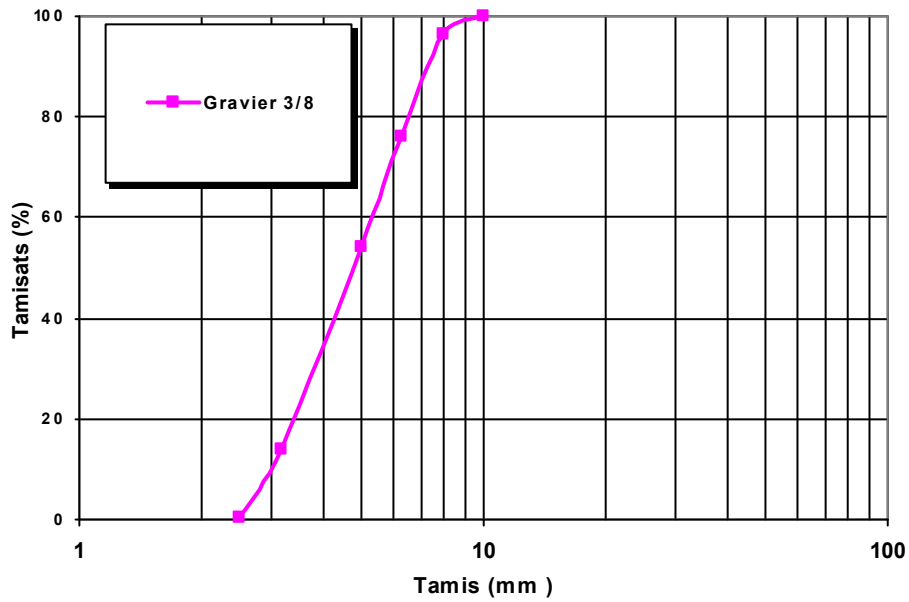


Fig. II.3: Courbe granulométrique du gravier 3/8

B-Propriétés physiques du gravier 3/8 :Masse volumique apparente = 1383 kg/m^3 Masse volumique absolue = 2585 kg/m^3

Coefficient de Los Angeles = 22% (dur)

Tableau II.8 : Analyse granulométrique du gravier 7/15

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisas cumulés (%)
20	0	0	0	100
15	424	424	28.3	71.7
12.5	760	1184	78.9	21.1
10	217	1401	93.4	6.6
8	68	1469	97.9	2.1
6.3	29	1498	99.8	0.2
5	2	1500	100	0

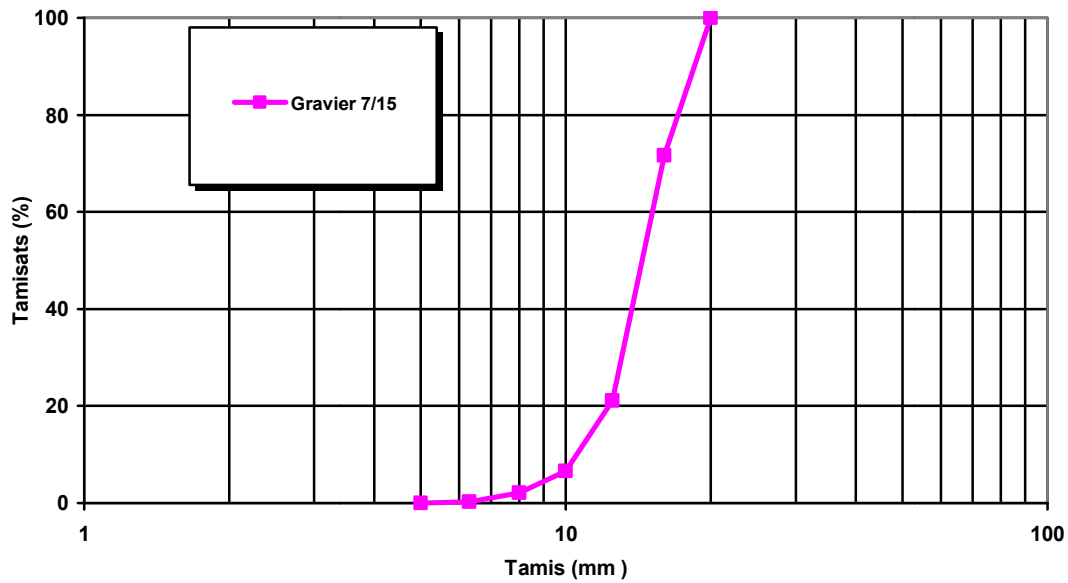


Fig. II.4 : Courbe granulométrique du gravier 7/15

B- Propriétés physiques du gravier 7/15 :

Masse volumique apparente = 1395 kg/m^3

Masse volumique absolue = 2678 kg/m^3

Coefficient de Los Angeles = 22% (**dur**)

II .2.3. Adjuvant :

Lors de ce mémoire nous avons utilisé un super plastifiant nommé MEDAPLAT SP 40 provenant de GRANITEX, Oued Smar (wilaya d'Alger), c'est un haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton, sa notice technique est présentée à l'annexe 1



Fig. II.5 : Le super plastifiant MEDAPLAT SP 40

II.2.4. Eau de gâchage :

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges est une eau potable de robinet de la ville de Biskra. Il s'agit d'une eau potable exempte d'impuretés. Sa température n'est pas contrôlée lors des gâchées, quoique le béton obtenu a une température assez constante d'un mélange à l'autre, de 18 à 20 °C.

II.2.5 Fibres :

II.2.5.1 Fibre de polypropylène :

Les fibres de polypropylène utilisées dans notre travail, ont de haute ténacité pour le renforcement des bétons et mortiers, et ont des longueurs 0.6 cm et 2.4 cm.

Propriétés des fibres de polypropylène :

- distribue les contraintes de retrait des liants hydrauliques dès l'hydratation.
- diminuant ainsi considérablement
 - les micro fissures
 - la perméabilité
 - L'impact des chocs

Dose : pour 1m³ de béton 0.6 kg



Fig. II.6 : Les fibres utilisées

fibre polypropylène 6 mm

fibre polypropylène 24mm

fibre d'acier

II.2.5.2 Fibre d'acier :

Nous avons utilisé des fibres métalliques nommé MEDAFAC provenant de GRANITEX, Oued Smar (wilaya d'Alger) c'est une fibre d'acier ondulée ses caractéristiques techniques lui permettent d'améliorer les résistances mécaniques du béton, sa notice technique est présentée à l'annexe 2.

II.2.6 Fumée de silice :

C'est une poudre de silice amorphe extrême fine, récupérée dans les cheminées lors de la condensation des gaz de réaction résultant de la fabrication du silicium ou de ses alliages. La fumée de silice a été ajoutée en remplaçant 8 % de ciment par une quantité équivalente de Fumée de silice, sa notice technique est présentée à l'annexe 3.

II.3 Mélanges :

La préparation des échantillons des bétons et des mortiers a été réalisé au niveau de laboratoire de matériaux université de Biskra.

II.3.1 Codification des mélanges :

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés afin de faciliter la lecture, le système retenu est composé d'une lettre M (ou B) qui signifie le mortier (ou le béton) suivies par :

NF: non fibré

FP : avec fibre de polypropylène

FPL : la fibre de polypropylène longue

FM : avec fibre métallique.

Suivies par un nombre qui représente la teneur en fibre.

Et puis +FS en cas de l'ajout de fumée de silice.

Donc MFPL3+FS est un mortier renforcé de 3% de fibre de polypropylène longue avec l'ajout de fumée de silice.

TableauII.9 : Codification des bétons

Mélanges	Fibre polypropylène 6mm	Fibre polypropylène 24mm	Teneur des fibres / le volume du béton en %	Fibre métallique 60mm	Teneur des fibres / le volume du béton en %
Bétons	BFP0.5	BFPL0.5	0.5	BFM1	1
	BFP1	BFPL1	1	BFM2	2
	BFP2	BFPL2	2	BFM3	3
	BFP4	BFPL4	4	BFM4	4

TableauII.10: Codification des mortiers

Mélanges	Fibre polypropylène 6mm	Fibre polypropylène 24mm	Teneur des fibres / la masse du ciment en 0.125%	Fibre métallique 60mm	Teneur des fibres / la masse du ciment en 2.5%
Mortiers	MFP1	MFPL1	1	MFM1	1
	MFP2	MFPL2	2	MFM2	2
	MFP3	MFPL3	3	MFM3	3
	MFP4	MFPL4	4	MFM4	4

II.3.2 Compositions des mélanges :

Le calcul de la composition des mortiers a été fait par la méthode des volumes absolus et celle du béton par la méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G)

nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successifs sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

Détermination du rapport C/E : Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey

$$\sigma_{28} = G \times \sigma_c \times (C/E - 0.5)$$

σ_{28} : Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ_c : Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C : Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E : Dosage en eau total matériau sec en litre par m³ de béton

G : Coefficient granulaire (Tab.4) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Détermination de C et E : la valeur de C est déterminée grâce à un abaque en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams, la quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

Détermination du mélange optimal à minimum de vides : Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros éléments, la courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence.
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

Détermination de la compacité du béton : pour déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m^3 de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, et de gravier). Sa valeur de base c_0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre, les corrections (c_1 , c_2 et c_3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées: $c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$.

Détermination des masses de granulats : connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G)

Tableau II.11 : Compositions des mélanges

	Ciment kg	Sable kg	Gravier 3/8 kg	Gravier 8/15 kg	E/L	Fumée de silice kg
Mortier 1	450	1350	/	/	0.55	/
Mortier 1+FS	414	1350	/	/	0.55	36
Mortier 2	350	1397	/	/	0.65	/
Mortier 2+FS	322	1397	/	/	0.65	28
béton	400	575	181	1066	0.5	/
Béton+FS	368	575	181	1066	0.5	32

Remarque : en confection, on doit prendre en considération la quantité d'eau qui se trouve dans l'adjuvant sous forme liquide.

II.3.3 Préparation et conservation des éprouvettes :

Selon les besoins, deux malaxeurs de capacités différentes ont été utilisés, un de capacité de 50 litres pour les gâchées destinées aux éprouvettes de bétons et un second d'une capacité de 5 litres pour les éprouvettes de mortier. Dans tous les cas, nous avons scrupuleusement respecté les séquences de fabrication des bétons (ou mortier)

- humidification du malaxeur au moyen d'une éponge

- pesée des différents constituants (ciment, sable, gravier, filler, fibres , super plastifiant et eau)
- préparation du mélange eau/super plastifiant.
- Introduction des granulats du plus gros au plus fin :gravillon , sable, ciment, et filler.
- malaxage à sec pendant 1 minute.
- Rajout de la moitié du mélange eau/super plastifiant.
- introduction des fibres.
- Malaxage du mélange pendant une minute
- rajout le reste du mélange eau/super plastifiant au fur et à mesure en malaxant pendant 3 minutes.
- La durée effective du malaxage est de 5 minutes.
- Après la réalisation des essais de caractérisation à l'état frais, on procède au remplissage des différents moules ,Toutes les éprouvettes ont été démoulées 1 jour après la fabrication. Elles ont ensuite été placées au bain d'eau à la température 20⁰c.

II.4 Caractéristiques à l'état frais

II.4.1 Ouvrabilité du mortier :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de la table à secousse, une fois mise en place , le mortier reçoit 15 chocs en 15 secondes et puis démoulé d'un moule tronconique , on mesure le diamètre de la galette ainsi obtenu. L'étalement en % est donné par la formule

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

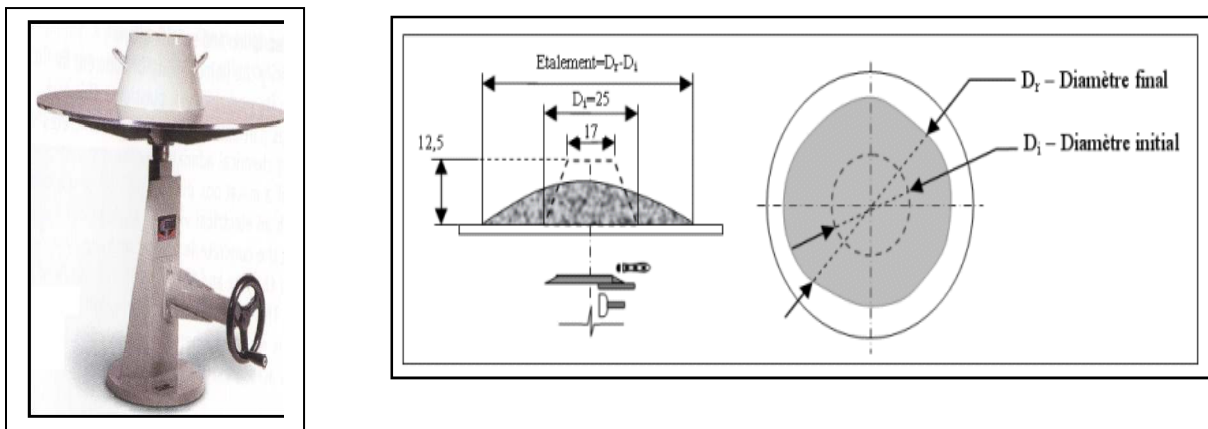


Fig. II.7 : Table à secousses

II.4.1 Essai d'affaissement au cône d'abrams :

L'essai d'affaissement est effectué dans le but de déterminer la maniabilité du béton. L'essai utilisé est celui décrit par la norme NFP 18-451. Il consiste à remplir un cône (appelé cône d'Abrams) de trois couches de béton d'égal volume et de piquer chaque couche de 25 coups par une tige en enfonçant légèrement cette dernière dans la couche précédente, après l'achèvement de la dernière couche, la surface de cette dernière est arasée. Le cône est ensuite retiré et l'affaissement peut ainsi être mesuré



Fig. II.8 : Cône d'Abrams pour l'essai d'affaissement

II.5 Caractéristiques à l'état durci :

II.5.1 Essai de traction par flexion du mortier :

La flexion centrée de l'éprouvette (4x 4 x 16) est effectuée sur une machine de flexion décrite par la norme NF EN 196-1. Les éprouvettes sont exposées à l'air libre pendant 20 minutes pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité.

Dans notre cas les valeurs sont lues directement sur la règle de l'appareil d'essai :

- La charge de rupture : P en N
- La contrainte de traction : σ_{tf} en N/ cm²

- La contrainte de flexion : σ_f en N/cm^2

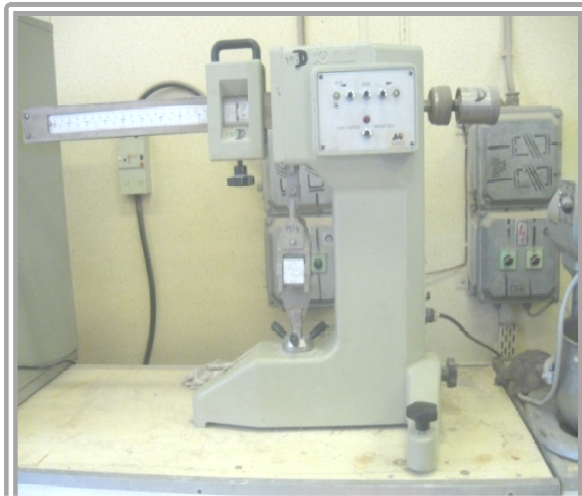


Fig. II.9 : Appareil de l'essai de traction par flexion trois points

II.5.2 Essais de traction par flexion du béton :

Il est réalisé, selon la norme (EN 12390-5), sur des éprouvettes prismatiques de $(10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3)$ mûries à l'eau. La résistance à la traction σ_{tf} obtenue à 28 jours provient de la moyenne des résultats sur trois échantillons. L'appareil utilisé est une presse hydraulique de flexion dont la capacité maximale est de 150 kN en cisaillement.



II.5.3 Essai de com **Fig. II.10:** Presse hydraulique de flexion

Les prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression. Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture est :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S}$$

On fait la moyenne des résultats obtenus pour chacun des 6 demi-prismes.

II.5.4 Essai de compression du béton :

Les essais de résistance à la compression σ_C par écrasement ont été effectués sur des éprouvettes cubiques $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ conformément à la norme NFP 18-406. La résistance à la compression est calculée à partir de la moyenne de 3 essais réalisés sur des éprouvettes identiques (même composition, mise en œuvre et conditions de laboratoire), l'écrasement des éprouvettes est fait sur une presse hydraulique de force 1300 KN et répandant aux prescriptions de la norme NFP 18-411, NFP 18-412.

la résistance à la compression σ_{cu} est calculée par la formule suivante :

$$\sigma_{cu} = \frac{F_c}{S}$$

F_c : est la charge de rupture de l'éprouvette en compression.

S : section de l'éprouvette.

La valeur moyenne de la résistance à la compression obtenue sur cubes (10x10x10) cm³ est multipliée par un coefficient d'équivalence égal à 0.75.



Fig. II.11 : Presse hydraulique pour l'essai de compression

II.6 Conclusion :

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, la composition et la préparation des mélanges ainsi que la conservation de éprouvettes vont nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène et de fibre d'acier sur le comportement mécanique des mortiers et des bétons.

Chapitre III

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS



ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, les résultats obtenus pendant le travail expérimental ont été présentés et suivis par une analyse et une discussion des résultats. Ceci, nous permet de bien comprendre l'influence de l'introduction des fibres et de certains paramètres sur le comportement rhéologique et mécanique des mortiers et des bétons fibrés à l'état frais et à l'état durci.

III.2 Programme expérimental :

L'étude expérimentale comporte deux formulations de mortier et une pour le béton, pour chaque formulation on a travaillé sur quatre séries :

1^{ère} série : renforcement avec fibre de polypropylène de 6mm de longueur.

2^{ème} série : renforcement avec fibre polypropylène de 24mm de longueur.

3^{ème} série : renforcement avec fibre d'acier.

4^{ème} série c'est la première série au quelle nous avons ajouté de la fumée de silice.

Pour les quatre séries nous avons réalisé l'essai de traction par flexion et l'essai de compression à différentes teneurs en fibres afin de :

- Voir l'effet de la teneur des fibres sur les mortiers et le béton.
- Etudier l'effet de la longueur des fibres en comparant les résultats de la 1^{ère} série et la 2^{ème} série.
- Voir l'effet de type des fibres.
- Voir l'effet de l'ajout de la fumée de silice pour les mortiers et béton fibrés.

III.3 Caractéristiques rhéologique a l'état frais

Les résultats de l'essai d'ouvrabilité des bétons et mortiers sont présentés au tableau III.1 :

Tableau III.1 : l'ouvrabilité des bétons et mortiers

Série 1	Affaissement au cône d'Abrams (cm)	Série 2	Affaissement au cône d'Abrams (cm)	Série 3	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
BNF	9	BNF	9	BNF	9
BFP0.5	7.9	BFPL0.5	8.2	BFM1	8.7
BFP1	6.5	BFPL1	7.5	BFM2	7.9
BFP2	4	BFPL2	5.3	BFM3	7.1
BFP4	1.5	BFPL4	4	BFM4	6
Série 1	Elancement à table secousse (%)	Série 2	Elancement à table secousse (%)	Série 3	Elancement à table secousse (%)
MNF	9.5	MNF	9.5	MNF	9.5
MFP1	8.5	MFPL1	9.0	MFM1	9.2
MFP2	7.5	MFPL2	8.3	MFM2	8.8
MFP3	6.15	MFPL3	7.3	MFM3	8.2

D'après le tableau III.1 on constate que les fibres diminuent l'ouvrabilité des bétons et des mortiers.

- Les fibres de polypropylène de 6 mm de longueur diminuent l'ouvrabilité des mortiers et bétons plus que les fibres de polypropylène qui ont une longueur de 24 mm, donc il semble que les paramètres géométriques de la fibre influencent la consistance des mortiers et des bétons parce que le mouillage des fibres nécessite une quantité d'eau plus grande que les fibres de 24 mm.
- Les fibres de polypropylène de (6 mm et 24 mm de longueur) diminuent l'ouvrabilité des mortiers et bétons beaucoup plus que Les fibres d'acier (nécessite une petite quantité d'eau pour le mouillage).
- La haute teneur en fibre rend le béton très ferme .

III.4 Caractéristiques mécaniques à l'état durci :

III.4.1 Etude de comportement mécanique des mortiers :

III.4.1.1 Essai de traction par flexion :

III.4.1.1.1 Essai de traction par flexion du mortier 1 : (utilisation de sable reconstitué)

Les résultats de traction par flexion pour le mortier 1 (sable reconstitué) sont cumulés au tableau III.2.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le mortier 1

Résistance à la traction par flexion (MPa)					
Jours	Série 1				
	MFP1	MFP2	MFP3	MFP4	MNF
7 j	3.0	3.3	3.6	3.2	2.9
28 j	5.4	6.1	6.6	5.7	5.0
Jours	Série 2				
	MFPL1	MFPL2	MFPL3	MFPL4	MNF
7 j	3.3	3.5	3.7	3.2	2.9
28 j	5.6	6.2	6.7	5.8	5.0
Jours	Série 3				
	MFM1	MFM2	MFM3	MFM4	MNF
7 j	3.2	3.4	3.8	3.2	2.9
28 j	6.1	6.6	7.1	6.1	5.0
Jours	Série 4				
	MFP1+FS	MFP2+FS	MFP3+FS	MFP4+FS	MNF+FS
7 j	3.3	3.5	3.9	3.2	3.0
28 j	6.3	6.9	7.4	6.2	5.4

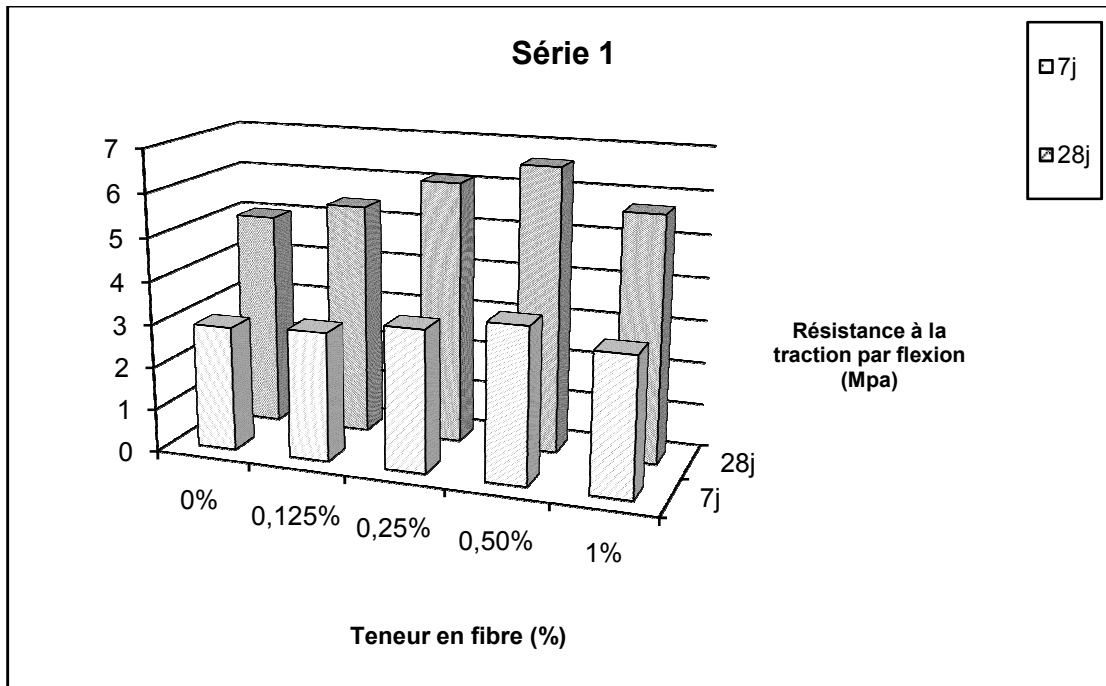


Fig. III.1 : Résistance à la traction par flexion pour la série 1 du mortier 1

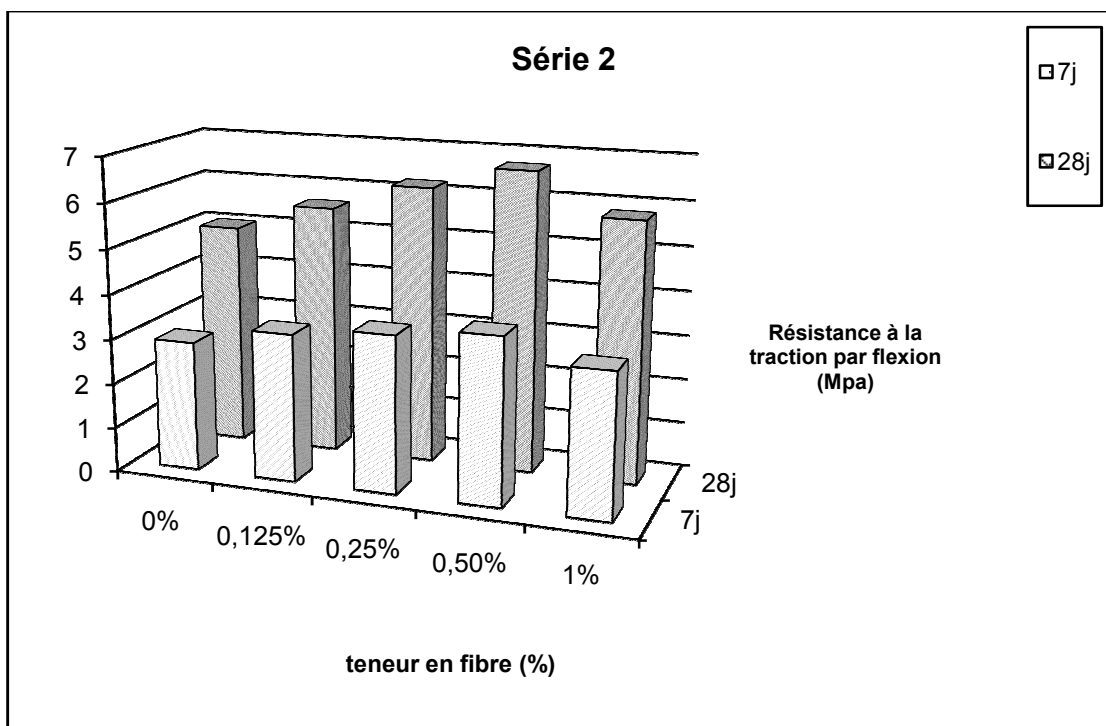


Fig.III.2 : Résistance à la traction par flexion pour la série 2 du mortier 1

On constate que l'ensemble des résultats obtenus, présente la même tendance à celle mentionné dans la bibliographie [50] pour mortier : le mortier fibré admet

une résistance à la traction par flexion plus importante que celle de mortier non fibré.

Série 1 : l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (6 mm de longueur) améliore respectivement la résistance à la traction par flexion par 8% - 22% - 32% - 14% à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

Série 2 : l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (24 mm de longueur) améliore respectivement la résistance à la traction par flexion par 12% -24% - 34% - 16% à 28 jours par rapport au mortier non fibré.



Fig.III.3: Les bulles de fibre en mortier fibré de 4% de fibre de polypropylène

- A la fin de l'essai il y a une seule fissure au milieu de l'éprouvette, on a vu à l'œil nu que l'ouverture des fissures diminue avec l'augmentation des teneurs en fibre.
- Le mortier non fibré a une rupture fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai).
- Le mortier fibré a une rupture ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).
- la résistance à la traction par flexion du mortier fibré augmente avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 0.5% de la masse du ciment par rapport le mortier non fibré
- il y a une diminution de résistance en compression pour la valeur 1% à cause de la formation des bulles des fibres.

- La résistance à la traction par flexion augmente avec l'augmentation de la longueur de fibre.



Fig. III.4 : La fragilité de mortier non fibré



Fig. III.5 : La ductilité du mortier fibré

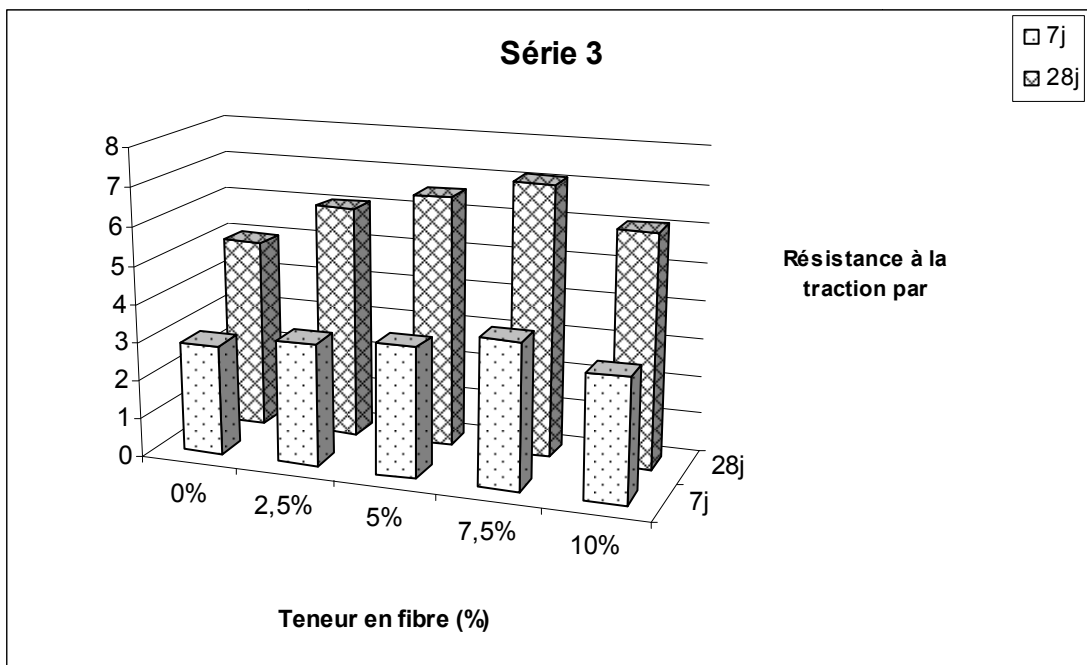


Fig.III.6 : Résistance à la traction par flexion pour la série 3de mortier 1

Série 3 : l'utilisation de 2.5% - 5% - 7.5% -10% de fibre d'acier améliore la résistance à la traction par flexion par 22% - 32% - 42% - 22% à 28 jours.

- A la fin de l'essai il y a deux fissures décalées au milieu de l'éprouvette.
- Le mortier non fibré a une rupture fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai).
- Le mortier fibré a une rupture ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).

- La résistance à la traction par flexion accroît avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 7.5% de la masse du ciment.
- Il y a une diminution de résistance à la traction par flexion. pour la valeur 10% .
- Les fibres d'acier améliorent la résistance à la traction par flexion de 0.5Mpa de plus que les fibres de polypropylène.

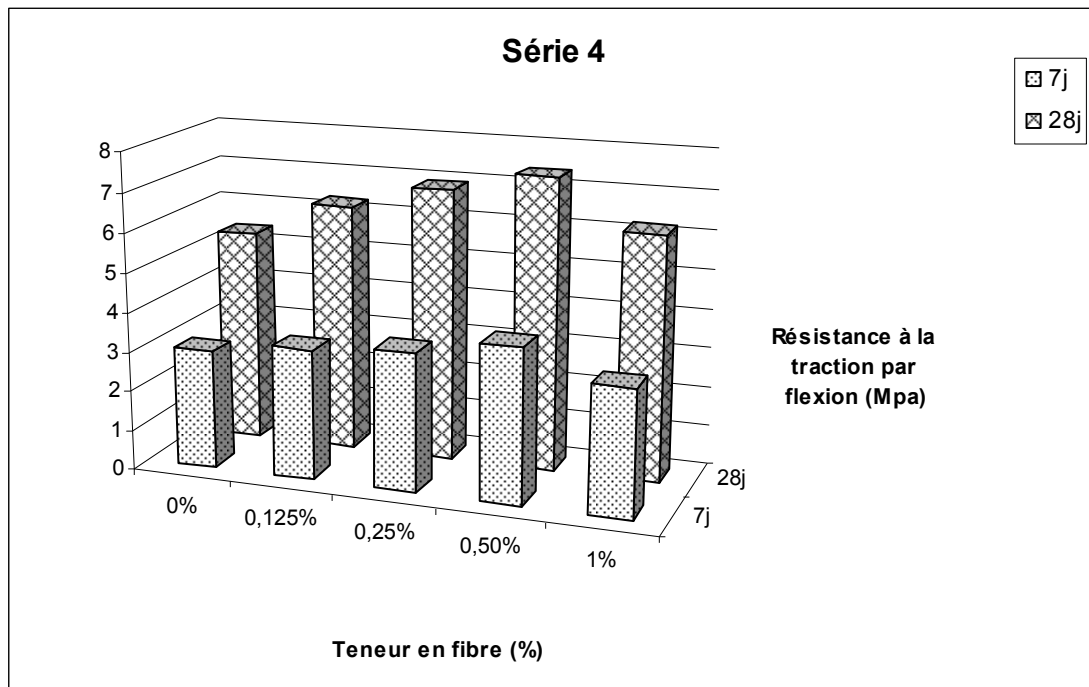


Fig. III.7: Résistance à la traction par flexion pour la série 4 de mortier 1

série 4 : le remplacement de 8% de ciment par la fumée de silice augmente la résistance à la traction par flexion par rapport à la série 1(sans fumée de silice) de 8% - 16.7% - 13.1% - 12.1% - 9% à 28 jours ce qui correspond respectivement au teneurs 0% - 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène de 6 mm.

L'utilisation de la fumée de silice avec 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène de 6 mm améliore respectivement la résistance à la traction par flexion par 16.7% - 27.7% - 37% - 14.8% par rapport au mortier non fibré.

- La résistance à la traction par flexion augmente monotonement avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 0.5% de la masse du ciment.

- Il y a une diminution de résistance pour la valeur 1% à cause de la formation des bulles des fibres.
- L'ajout de fumée de silice augmente la résistance à la traction par flexion de 8% jusque 16% par rapport à la série1 (sans fumée de silice).

III.4.1.1.2 Essai de traction par flexion du mortier 2 :

Les résultats de l'essai de traction par flexion pour le mortier 2 sont cumulés au tableau III.3, on a réalisé seulement 3 séries, l'influence de l'ajout de la fumée de silice a été déjà étudiée pour le mortier1.

Tableau III.3 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le mortier 2

Résistance à la traction par flexion (MPa)					
Jours	Série 1				
	M2FP1	M2FP2	M2FP3	M2FP4	M2NF
7 j	2.9	3.0	3.2	2.6	2.5
28 j	5.4	5.1	5.9	4.9	4.8
Jours	Série 2				
	M2FPL1	M2FPL2	M2FPL3	M2FPL4	M2NF
7 j	2.9	3.4	3.7	2.8	2.5
28 j	5.7	6.1	6.5	5.3	4.8
Jours	Série 3				
	M2FM1	M2FM2	M2FM3	M2FM4	M2NF
7 j	3.1	3.2	3.3	3	2.5
28 j	5.5	5.9	6	5.4	4.8

Les résultats obtenus dans le tableau III.3 confirment les résultats obtenus pour le mortier 1 , le mortier 2 fibré admet une résistance à la traction par flexion plus importante que celle de mortier non fibré pour des teneurs variant de 0.125% - 0.25% - 0.5% pour le mortier renforcé de fibre de polypropylène et de 1 jusque 4% pour fibre d'acier.

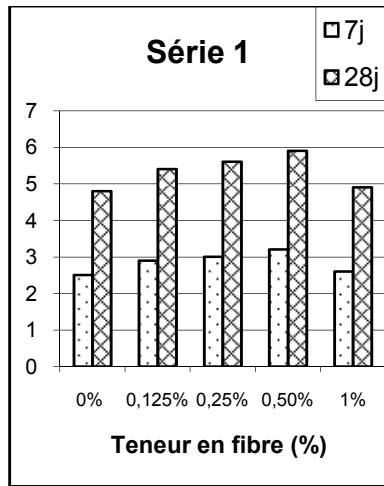


Fig. III.8 :Résistance à la traction par flexion pour la série1 de mortier 2

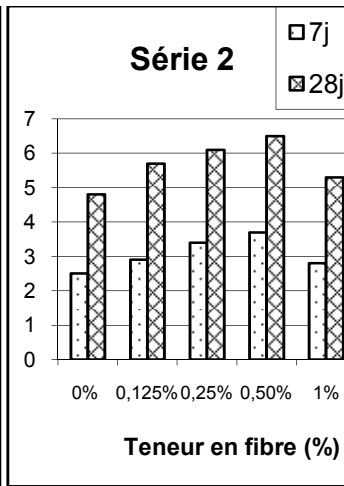


Fig. III.9:Résistance à la traction par flexion pour la série 2 de mortier 2

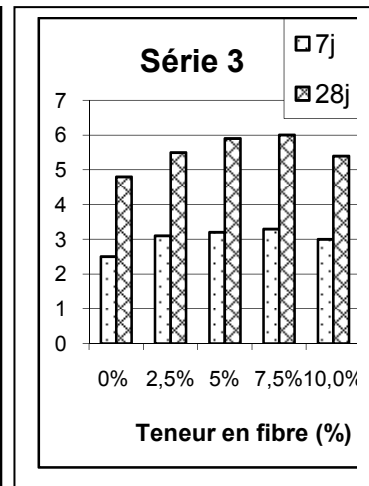


Fig. III.10 :Résistance à la traction par flexion pour la série 3 de mortier 2

III.4.1.2 Essai de compression :

III.4.1.2.1 Essai de compression du mortier 1 :

Les résultats de l’essai de compression pour le mortier 1 sont présentés au (tableau III.4).

Tableau III.4 : Résultats de l’essai de compression pour le mortier 1

Résistance à la compression (MPa)					
Jours	Série1				
	MFP1	MFP2	MFP3	MFP4	MNF
7 j	28.7	28.2	27.9	27.6	29.9
28 j	41.4	40.2	39.8	39.3	41.8
Jours	Série 2				
	MFPL1	MFPL2	MFPL3	MFPL4	MNF
7 j	29.1	28.4	28	27.5	29.9
28 j	40.8	39.7	39.3	38.5	41.8
Jours	Série 3				
	MFM1	MFM2	MFM3	MFM4	MNF
7 j	31.2	31.7	32.1	32.4	29.9
28 j	42.2	42.9	43.3	43.4	41.8
Jours	Série 4				
	MFP1+FS	MFP2+FS	MFP3+FS	MFP4+FS	MNF+FS
7 j	30.4	29.3	28.9	28.4	31.1
28 j	44.2	43.5	42.9	42.4	44.9

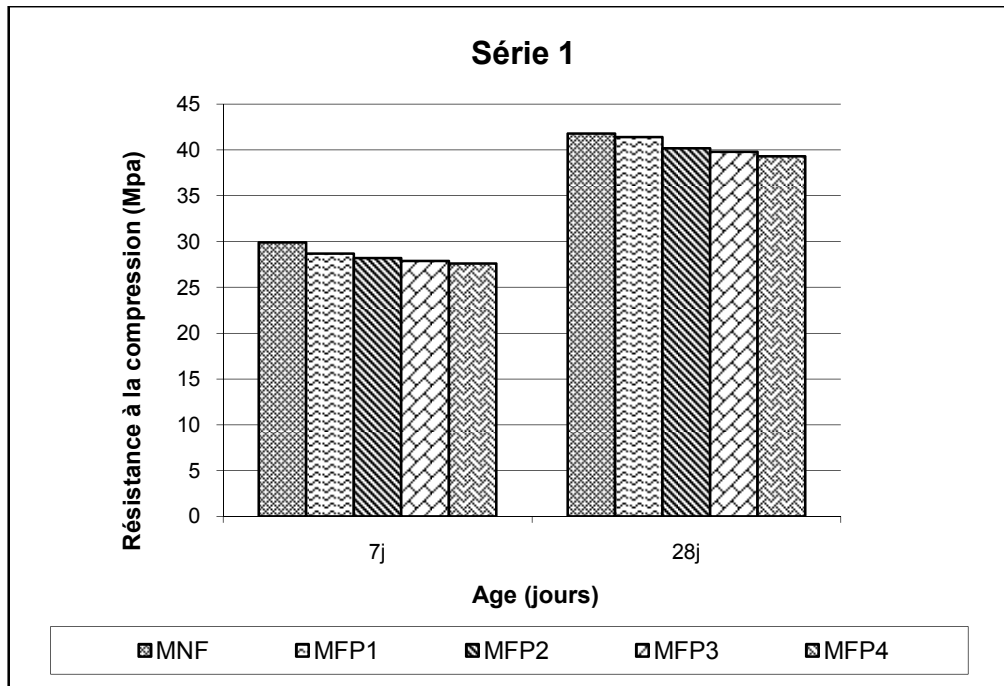


Fig. III.11 : Résistance à la compression pour la série 1 de mortier 1

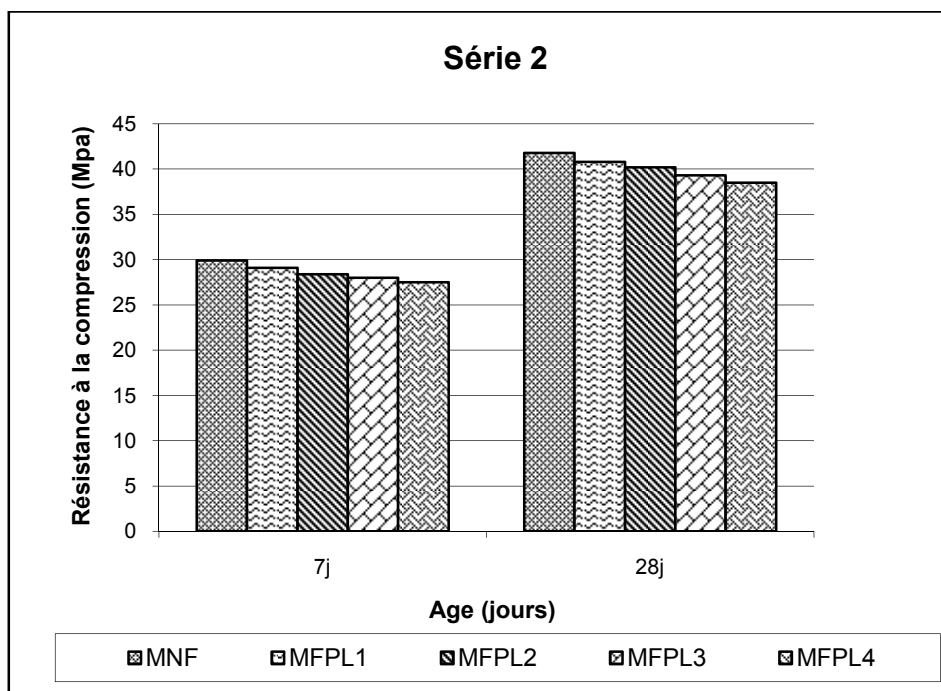


Fig. III.12 : Résistance à la compression pour la série 2 de mortier 1

On constate que l'ensemble des résultats présente la même tendance observée auparavant : pour le mortier renforcé de fibre de polypropylène une légère diminution de la résistance à la compression par rapport à celle de mortier non

fibré, et pour le mortier renforcé de fibre d'acier une légère augmentation de la résistance de compression a été observée.

Série 1 : d'après le tableau on observe que l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (6 mm de longueur) diminue légèrement la résistance à la compression par 0.9% - 3.8% - 4.8% - 6% respectivement à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

Série 2 : on observe aussi que l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (24mm de longueur) diminue légèrement la résistance à la compression par 2.4% - 5% - 6% - 7.9% respectivement à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

- la résistance à la compression diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs en fibre de polypropylène de 0% jusque 0.5% de la masse du ciment.
- La diminution de la résistance à la compression est proche pour les fibres longues.

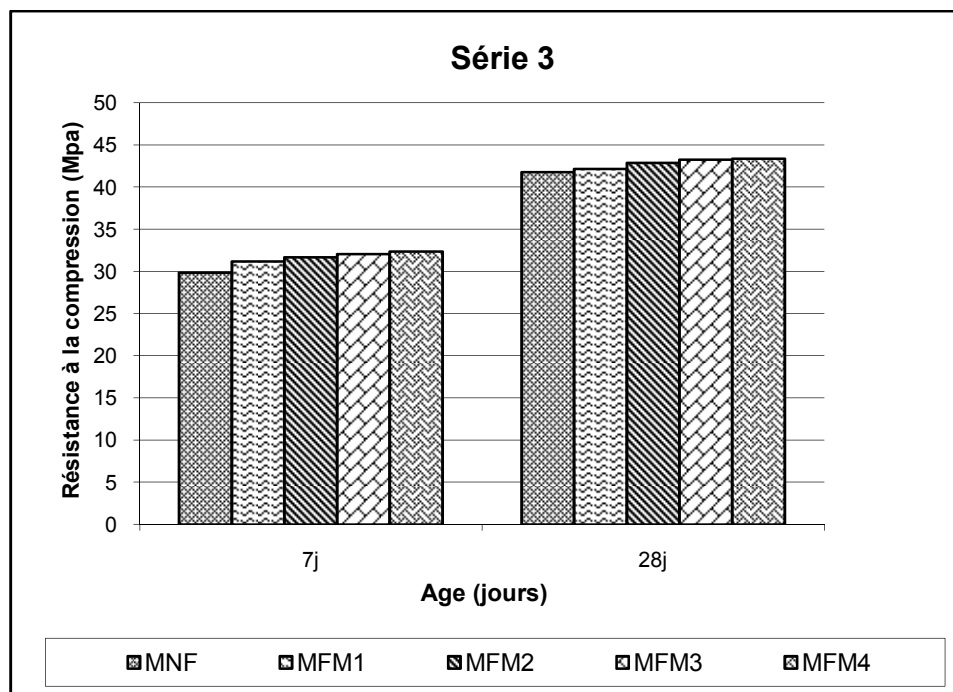


Fig. III.13 : Résistance à la compression pour la série 3 de mortier 1

Série 3 : d'après la figure III.14 , on observe que l'utilisation de 2.5% - 5% - 7.5% -10% de fibre d'acier améliore respectivement la résistance à la compression par

1%- 2.6% - 3.6% - 3.8% à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

- La résistance à la compression augmente légèrement avec l'augmentation des teneurs en fibre d'acier de 0% jusque 10% de la masse du ciment.
- Le choix de la teneur optimale dépend du couple performance-coût.

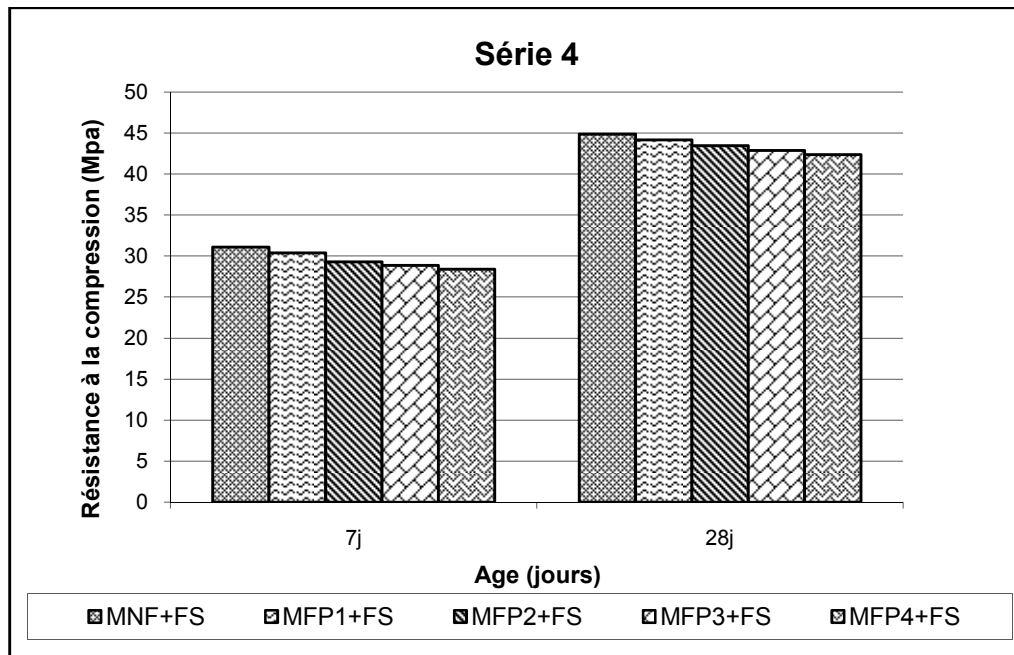


Fig. III.14 : Résistance à la compression pour la série 4 de mortier 1

Série 4 : l'utilisation de fumée de silice avec 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène de 6 mm diminue respectivement la résistance à la compression par 1.1% - 3.1% - 4.4% - 5.5% par rapport au mortier non fibré.

Le remplacement de 8% de ciment par le fumée de silice augmente la résistance à la compression de 7% - 8.4% - 8% - 6.9% MPA par rapport à la série 1 (sans fumée de silice) à 28 jours ce qui correspond respectivement au teneurs 0% - 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène de 6 mm.

- La résistance à la compression diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs des fibres.
- La fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression.

III.4.1.2.2 Essai de compression du mortier 2

Les résultats de l'essai de compression pour le mortier 2 sont présentés au (tableau III.5).

Tableau III.5 : Résultats de l'essai de compression pour le mortier 2

Résistance à la compression (MPa)					
Jours	Série 1				
	M2FP1	M2FP2	M2FP3	M2FP4	M2NF
7 j	23.8	22.9	22.4	21.1	24.4
28 j	33.4	32.4	31.0	29.5	34.2
Jours	Série 2				
	M2FPL1	M2FPL2	M2FPL3	M2FPL4	M2NF
7 j	23.4	22.4	21.9	20.3	24.4
28 j	34.4	32.5	31.3	29.1	34.2
Jours	Série 3				
	M2FM1	M2FM2	M2FM3	M2FM4	M2NF
7 j	22.4	23.5	20.7	20.4	24.4
28 j	34.1	36.1	32.8	30.4	34.2

De la même façon, les résultats de mortier 2 confirment que l'utilisation des fibres diminue la résistance à la compression

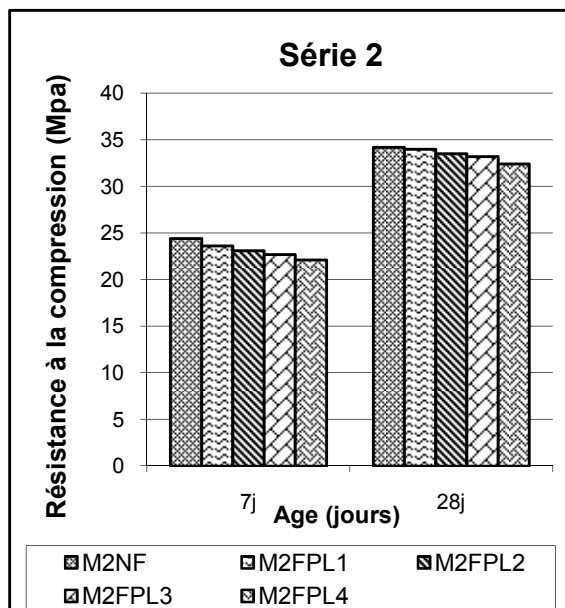


Fig. III.15 : Résistance à la compression pour la série 1 de mortier 2

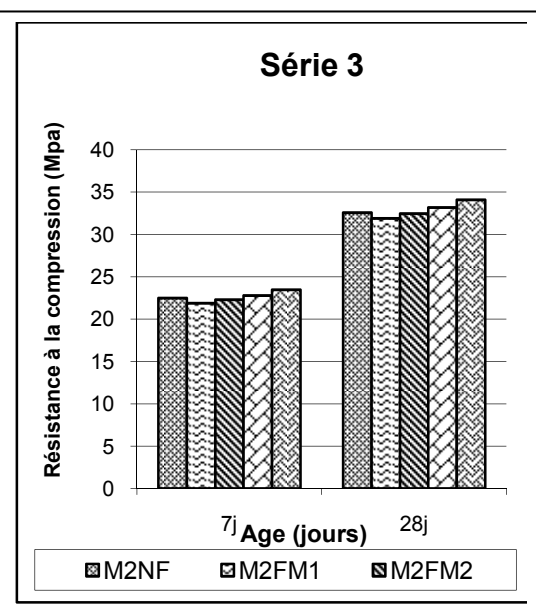


Fig. III.16 : Résistance à la compression pour la série 2 de mortier 2

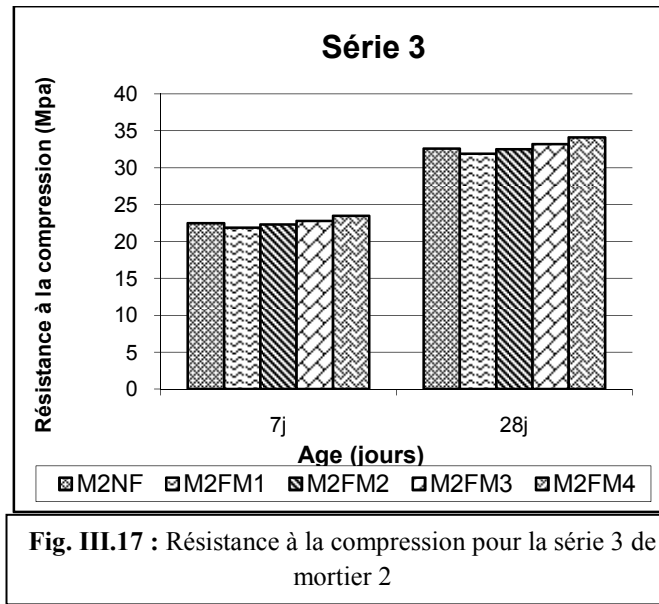


Fig. III.17 : Résistance à la compression pour la série 3 de mortier 2

III.4.2 Etude du comportement mécanique des bétons fibrés :

III.4.2.1 Essai de traction par flexion du béton :

Les résultats de l'essai de compression du béton sont présentés au tableau III.6 :

Tableau III.6 : Résultats de l'essai de traction par flexion pour le béton

Résistance à la traction par flexion σ_{tf} (MPa)					
Série 1					
Jours	BFP0.5	BFP1	BFP2	BFP4	BNF
7 j	3	3.2	3.3	2.6	2.8
28 j	5.5	5.9	6.1	5.1	5.2
Série 2					
Jours	BFPL0.5	BFPL1	BFPL2	BFPL4	BNF
7 j	3.0	3.2	3.4	2.6	2.8
28 j	5.4	5.8	6.3	5	5.2
Série 3					
Jours	BFM1	BFM2	BFM3	BFM4	BNF
7 j	3.2	3.3	3.6	3.8	2.8
28 j	5.9	6.2	6.8	7.1	5.2
Résistance à la traction par flexion (MPa)					
Série 4					
Jours	BFP0.5+FS	BFP1+FS	BFP2+FS	BFP4+FS	BNF+FS
7 j	3.2	3.5	3.8	3	3.1
28 j	6.1	6.7	7	5.7	5.9

On constate que l'ensemble des résultats obtenus dans cette partie, présente la même tendance vérifiée pour le mortier. En effet, le béton fibré admet une résistance à la traction par flexion supérieure à celle de béton non fibré.

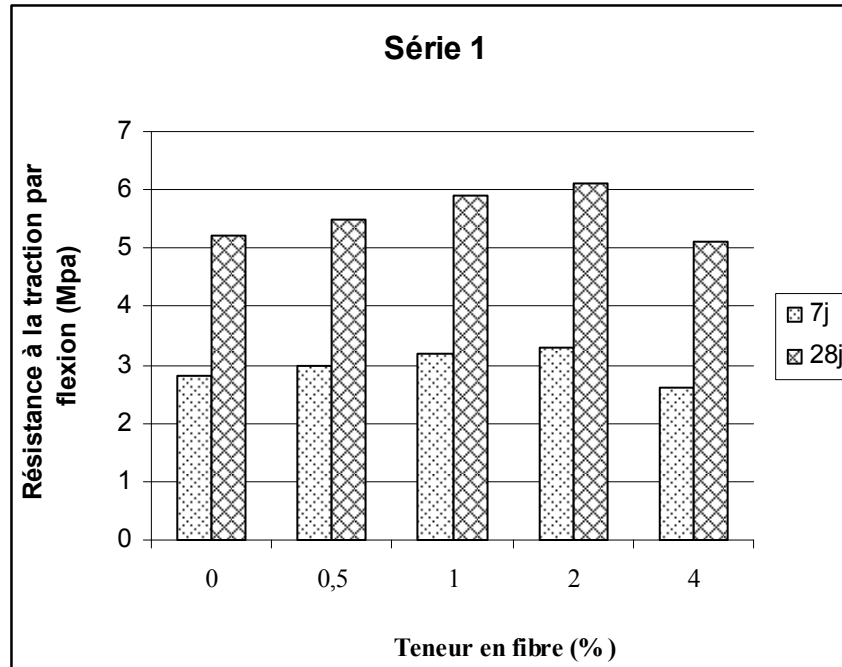


Fig. III.18 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 1-

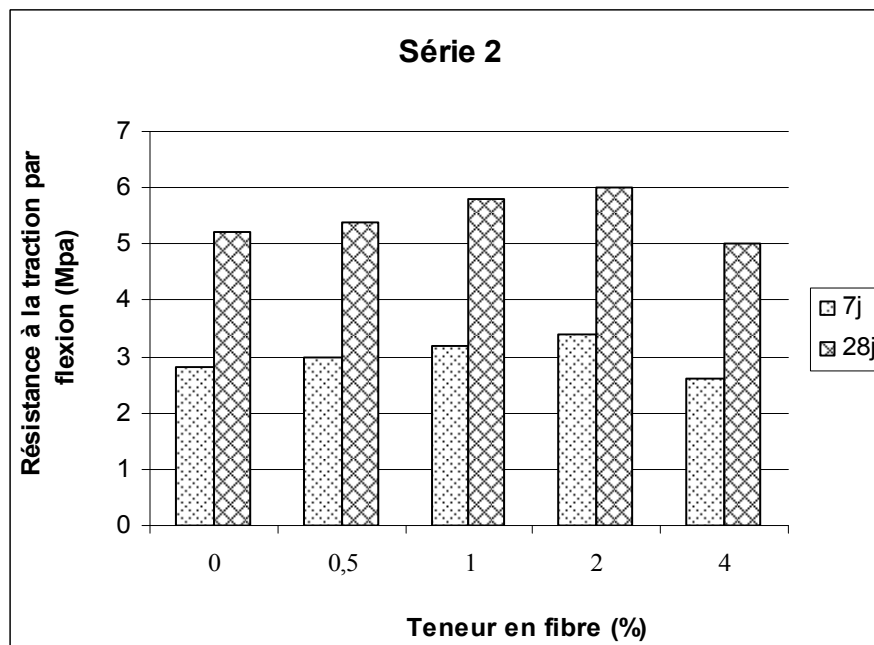


Fig. III.19: Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 2-

Série 1 : l'utilisation de 0.5% -1% -2% de fibres de polypropylène (6mm de longueur) améliore respectivement la résistance à la traction par flexion du béton

par 5.8%- 13.5% - 17.3% à 28 jours pour le béton (par rapport au béton non fibré). Pour la valeur de 4% il y a une diminution de 4% cette valeur est considérée excessive pour le béton de fibre de polypropylène, il est conseillé d'utiliser ces fibres en teneurs volumiques variées de 0.5% et 2%.

Série 2 : l'utilisation de 0.5% -1% -2% de fibres de polypropylène (24mm de longueur) améliore respectivement la résistance à la traction par flexion du béton par 3.8% -11.5% -21.1% à 28 jours par rapport au béton non fibré .Pour la valeur de 4% il y a une diminution de 4% cette valeur est considérée excessive.

- A la fin de l'essai il y a une seule fissure décalée médiocrement au milieu de l'éprouvette (l'hétérogénéité du béton), on a vu à l'œil nu que l'ouverture de fissures diminue avec l'augmentation des teneurs en fibre.
- Le béton non fibré a un comportement fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai).
- Le béton fibré a un comportement ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).
- La résistance à la traction par flexion augmente monotonement avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 2% .
- La diminution de la résistance pour la valeur 4% à cause de la formation des bulles des fibres, donc la haute teneur en fibre a l'effet inverse sur la résistance à la traction par flexion.
- La résistance à la traction par flexion augmente légèrement avec l'augmentation de la longueur de fibre.

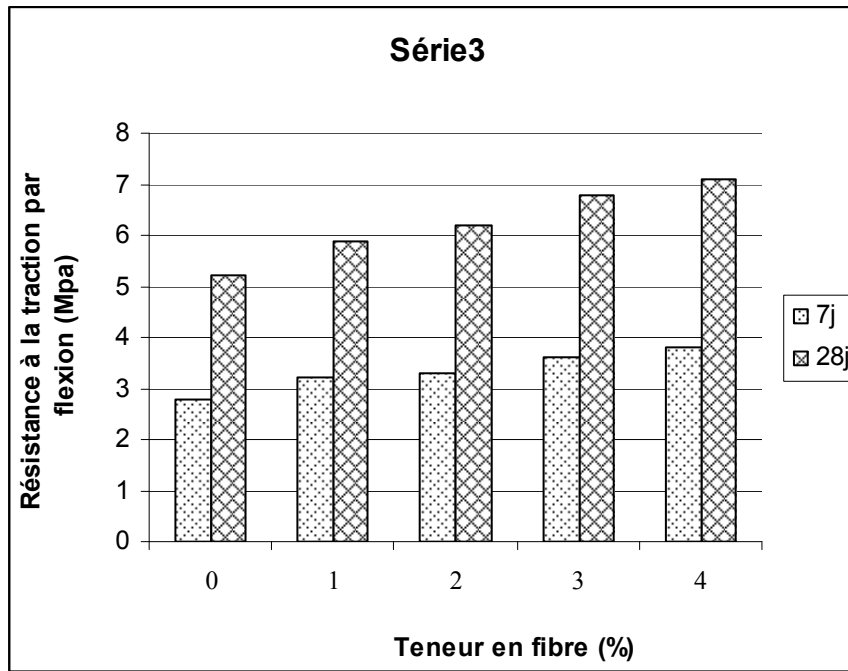


Fig. III.20 : Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 3-

Série 3 : l'utilisation de 1% - 2% - 3% - 4% de fibre d'acier améliore la résistance à la traction par flexion par 13.5% - 19.2% - 30.8% - 36.5% à 28 jours.

- A la fin de l'essai il y a une fissure décalée médiocrement à la moitié à de l'éprouvette.
- Le béton non fibré a un comportement fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai).
- Le béton fibré a un comportement ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).
- La résistance à la traction par flexion du béton fibré augmente monotonement avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 4%. (teneur en fibres d'acier)
- Les fibres d'acier améliorent la résistance à la traction par flexion plus que les fibres de polypropylène.

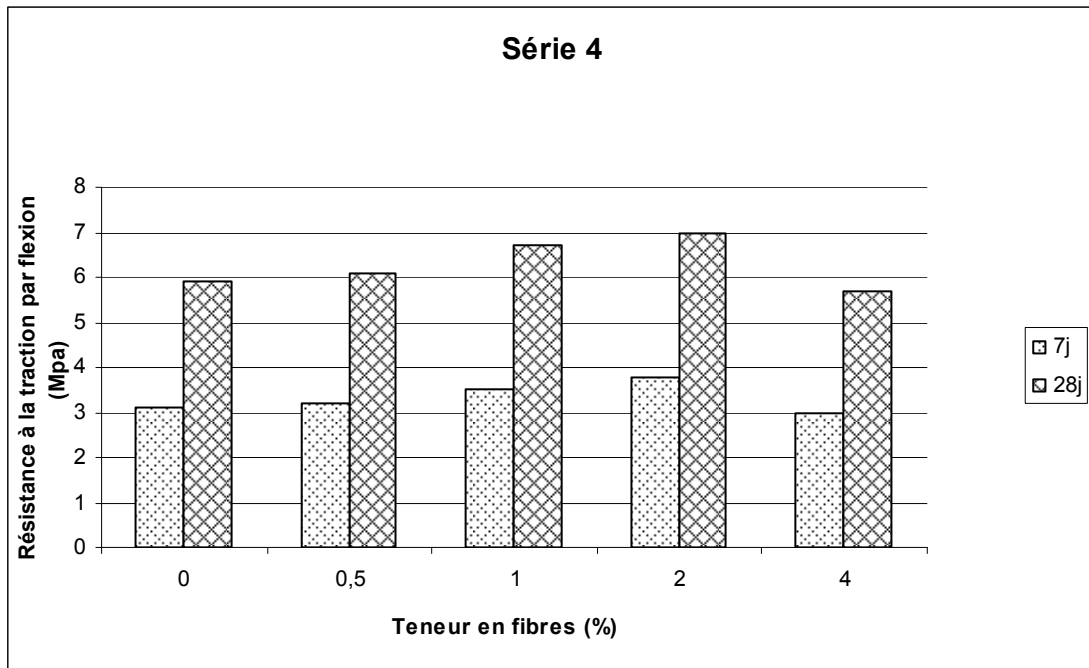


Fig. III.21: Résistance à la traction par flexion pour le béton - série 4-

Série 4 : le remplacement de 8% de ciment par le fumée de silice augmente la résistance à la traction par flexion du béton par rapport à la série 1 (sans fumée de silice) de 13.5% - 10.9% - 13.6% - 14.8% - 11.8% à 28 jours correspondant respectivement aux teneurs 0% - 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène.

L'utilisation de fumée de la silice avec 0.5% - 1% - 2% de fibre de polypropylène (6 mm de longueur) améliore respectivement la résistance à la traction par flexion par 3.4% - 13.5% - 18.6% - 14.8% par rapport au béton non fibré, la teneur 4% diminue la résistance à la traction par flexion du béton.

- La résistance à la traction par flexion du béton augmente monotonement avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 2%.
- Il y a une diminution de résistance pour la valeur 4% à cause de la formation des bulles des fibres.
- L'ajout de fumée de silice augmente la résistance à la traction par flexion de 10% jusque 14% par rapport à la série 1 (sans fumée de silice).

III.4.2.2 Essai de compression du béton :

Les résultats obtenus pour l'essai de compression sont présentés au tableau III.7 :

Tableau III.7 : Résultats de l'essai de compression pour le béton

Résistance à la compression σ_c (MPa)					
Série 1					
jours	BFP0.5	BFP1	BFP2	BFP4	BNF
7 j	25.7	24.7	24.0	23.8	26.3
28 j	37.6	36.8	35.2	34.5	38.2
Série 2					
Jours	BFPL0.5	BFPL1	BFPL2	BFPL4	BNF
7 j	26.1	25.4	24.5	23.9	26.3
28 j	37.8	36.9	36	35	38.2
Série 3					
Jours	BFM1	BFM2	BFM3	BFM4	BNF
7 j	27.4	29.2	29.7	29.8	26.3
28 j	38.9	40.3	40.9	41.2	38.2
Série 4					
Jours	BFP0.5+FS	BFP1+FS	BFP2+FS	BFP4+FS	BNF+FS
7 j	30	29.1	28.4	28.0	30.4
28 j	43.9	43.1	42.5	42	44.7

On constate que l'ensemble des résultats obtenus, confirme les constatations observées antérieurement :

- pour le béton renforcé de fibre de polypropylène ,une légère diminution de la résistance à la compression par rapport à celle de mortier non fibré.
- pour le béton renforcé de fibre d'acier une légère augmentation de la résistance à la compression a été observée.

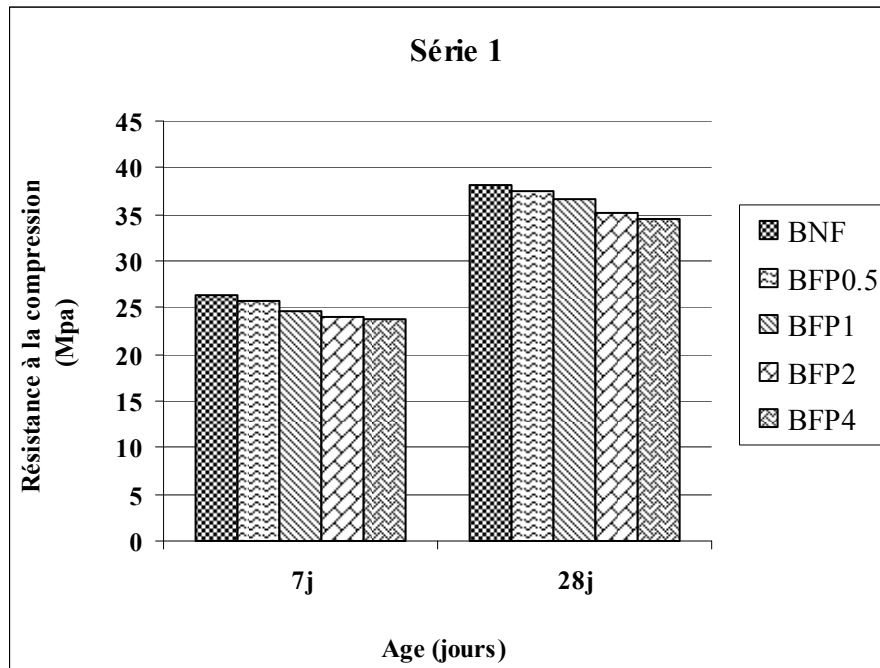


Fig. III.22 : Résistance à la compression pour le béton - série 1-

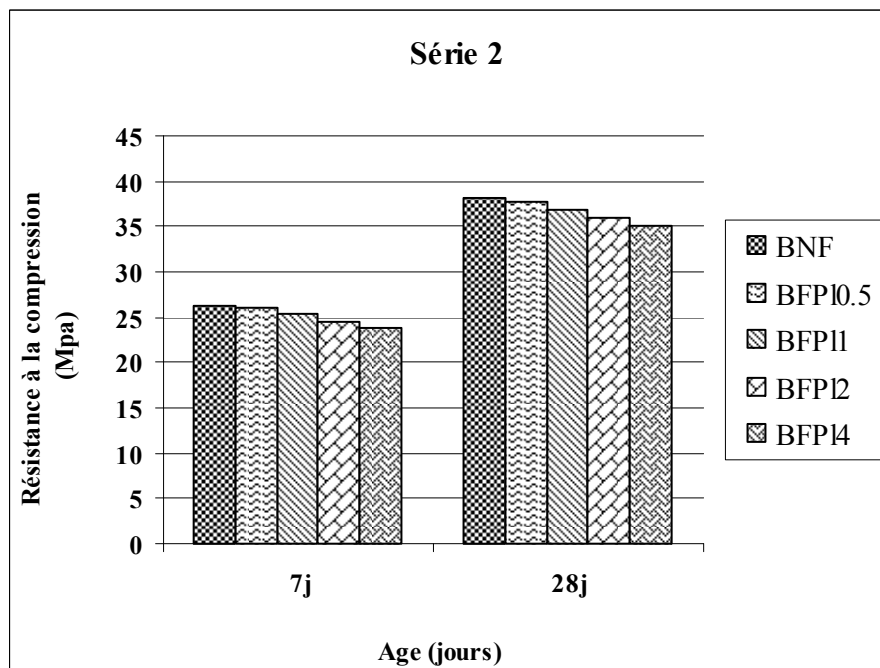


Fig. III.23 : Résistance à la compression pour le béton - série 2-

Série 1 : d'après le tableau III.7, on observe que l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (6 mm de longueur) diminue légèrement la résistance à la compression par 1.6% - 3.7% - 7.9% - 9.7% respectivement à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

Série 2 : on observe aussi que l'utilisation de 0.125% - 0.25% - 0.5% - 1% de fibre de polypropylène (24mm de longueur) diminue légèrement la résistance à la compression par 1% - 3.4% - 5.8% - 8.4% respectivement à 28 jours pour le mortier (par rapport au mortier non fibré).

- La résistance à la compression diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs en fibre de polypropylène de 0% jusque 0.5% de la masse du ciment.
- La diminution de la résistance à la compression est proche pour les deux longueurs des fibres de polypropylène.

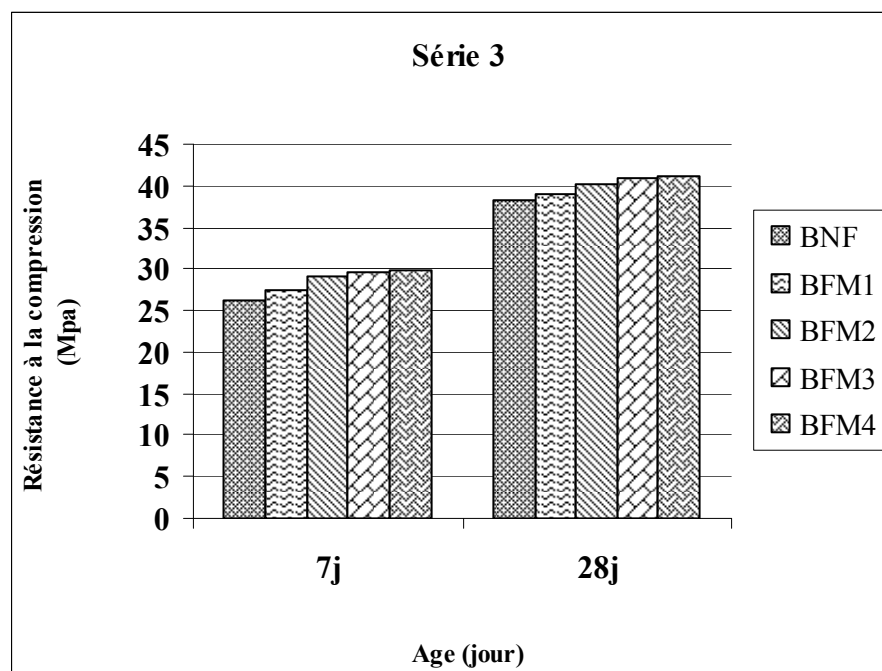


Fig. III.24 : Résistance à la compression pour le béton - série 3-

Série 3 : d'après le tableau III.7 on observe que l'utilisation de 1% - 2% - 3% - 4% de fibre d'acier améliore respectivement la résistance à la compression du béton fibré par 1.8% - 5.5% - 7% - 7.9% à 28 jours par rapport au béton non fibré.

- La résistance à la compression diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs en fibre d'acier de 0% jusque 10% de la masse du ciment.
- Le choix de la teneur optimale dépend du couple performance-coût.

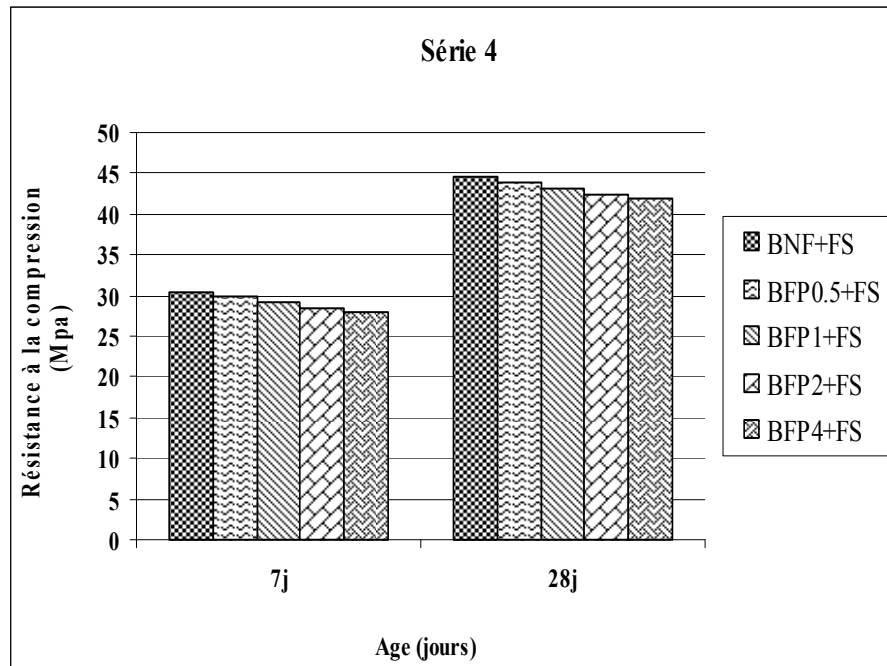


Fig. III.25: Résistance à la compression pour le béton - série 1-

Série 4 : l'utilisation de la fumée de silice avec 0.5% - 1% - 2% - 4% de fibre de polypropylène 6 mm de longueur diminue légèrement la résistance à la traction par flexion du béton par 1.8% - 3.5% - 4.9% - 6% respectivement par rapport au béton non fibré.

le remplacement de 8% de ciment par la fumée de silice augmente la résistance à la compression du béton de 17% - 16.8% - 17.2% - 20.7% - 21.7% MPA par rapport à la série 1 (sans fumée de silice) 28 jours correspondant respectivement au teneurs 0.5% - 1% - 2% - 4% de fibre de polypropylène de 6 mm.

- La résistance à la compression du béton diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs des fibres.
- La fumée de silice joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression du béton.

Conclusion :

Les résultats obtenus et présentés dans ce chapitre nous permettent de conclure que :

- ✓ l'introduction des fibres dans la composition des bétons et des mortiers conduit à leurs acquérir une certaine ductilité.
- ✓ l'introduction des fibres pour une matrice cimentaire diminue sa consistance.
- ✓ les fibres de polypropylène donnent une excellente ténacité à cause de son allongement à la rupture élevée par rapport aux fibres d'acier.
- ✓ pour les mortiers et les bétons, les fibres de polypropylène améliorent la résistance à la traction par flexion, cependant elles diminuent légèrement la résistance à la compression.
- ✓ la forme choisie des fibres d'acier permet une bonne adhésion avec la matrice.
- ✓ les fibres d'acier améliorent légèrement la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression pour les mortiers et les bétons.
- ✓ Une haute teneur en fibre dans la composition des mélanges étudiés a un effet négatif sur le comportement des matériaux composites à base des matrices cimentaires.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail consiste en l'étude du comportement mécanique des matériaux composites, dans ce but, l'étude est basée sur les composites à matrices cimentaires (bétons et mortiers) renforcées de fibres.

L'ensemble des essais que nous avons effectué sur le comportement mécanique du mortier renforcé de fibres nous a conduit à présenter les conclusions suivantes :

- Le mortier non fibré a eu un comportement fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai).le mortier fibré a eu un comportement ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).
- A la fin de l'essai de traction par flexion du mortier renforcé de fibre de polypropylène, il y a une seule fissure à la moitié de l'éprouvette ; mais pour mortier renforcé de fibre d'acier, il y'avait deux à trois fissures décalées à la moitié de l'éprouvette parce que l ajout de fibre crée une hétérogénéité pour mortiers et bétons, on a vu à l'œil nu que l'ouverture de fissures diminue avec l'augmentation des teneurs en fibre.
- L'introduction des fibres de polypropylène et d'acier peut augmenter la résistance à la traction par flexion de mortier de 30% et 40% par rapport au mortier non fibré.
- Il y a une diminution de résistance à la traction par flexion du mortier renforcé de fibre de polypropylène et d'acier pour la valeur 1% et 10% à cause de la formation des bulles des fibres.
- La résistance à la traction par flexion du mortier renforcé de fibre de polypropylène augmente légèrement avec l'augmentation de la longueur de fibre.
- La résistance à la compression du mortier diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs en fibre .

- La diminution de la résistance à la compression du mortier renforcé de fibre de polypropylène est proche pour les fibres de polypropylène de 6 mm et 24 mm.
- Le choix de la teneur optimale dépend du couple performance-coût.
- L'ajout de la fumée de silice augmente la résistance à la traction par flexion de 8% jusque 16%, la fumée de silice joue aussi un rôle bénéfique sur la résistance à la compression.

Pour la même manière l'ensemble des essais que nous avons effectué sur le comportement mécanique du béton renforcé de fibres nous a conduit à présenter les conclusions suivantes :

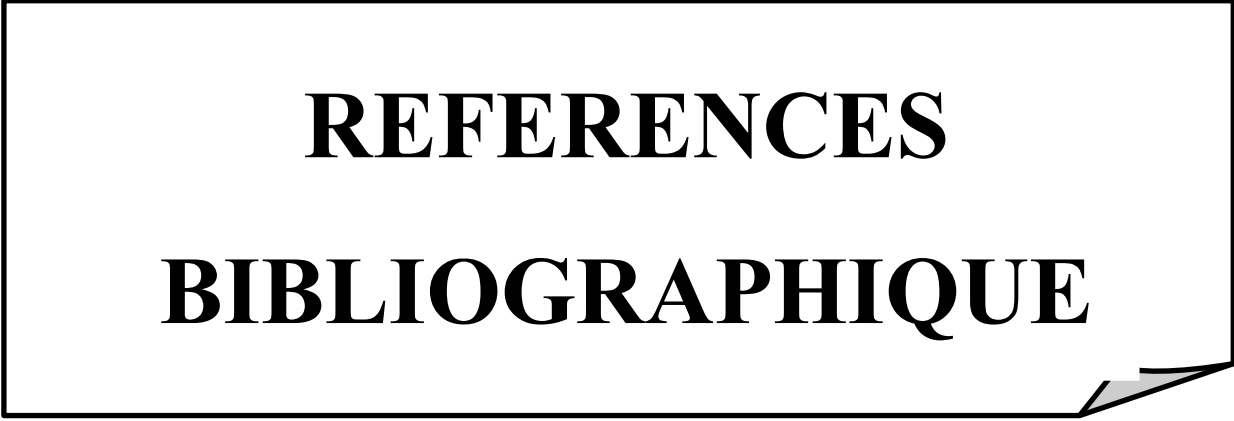
- A la fin de l'essai de traction par flexion ; il y a une seule fissure décalée médiocrement au milieu de l'éprouvette (l'hétérogénéité du béton),le béton non fibré a eu un comportement fragile (l'éprouvette casse en deux parties à la fin de l'essai) contrairement au béton fibré qui a eu un comportement ductile (une seule éprouvette fissurée à la fin de l'essai).
- La résistance à la traction par flexion du béton renforcé de fibres de polypropylène et d'acier augmente monotonement avec l'augmentation des teneurs de 0% jusque 2% et de 0% jusque 4% respectivement.
- La diminution de résistance du béton renforcé de fibre de polypropylène à la valeur 4% à cause de la formation des bulles des fibres, donc la haute teneur en fibre a l'effet inverse sur la résistance à la traction par flexion.
- Les fibres d'acier améliorent la résistance à la traction par flexion beaucoup plus que les fibres de polypropylène.
- La résistance à la compression du béton diminue légèrement avec l'augmentation des teneurs des fibres de polypropylène, et augmente légèrement avec l'augmentation des fibres d'acier.
- L'ajout de la fumée de silice augmente La résistance à la traction par flexion de 10% jusque 14% et joue un rôle bénéfique sur la résistance à la compression du béton.

– Le choix de la teneur optimale dépend du couple performance-coût

Il en ressort de cette étude que les mortiers et bétons fibrés présentent des comportements différents à ceux des mortiers et bétons témoin, l'introduction des fibres mène à améliorer principalement la fragilité en augmentant la ténacité des bétons et mortiers.

Et pour des plus amples recherches on propose :

- Modélisation du comportement mécanique des mortiers et bétons fibrés.
- Etude du comportement des composites à base d'une matrice cimentaire à une température élevée.
- Etude de comportement dynamique des bétons fibrés.
- L'influence des fibres sur la fissuration précoce des bétons.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

Références bibliographiques

- [1] A. G. Plăiașu, The composite materials away to replace traditional materials. the annals of “dunărea de jos” university of galați Fascicle v, technologies in machine building, issn 1221-4566, 2008.
- [2] M. Boukhezar, Etude paramétrique du comportement d'une poutre renforcée en matériaux composites en comparaison avec celle de béton armé , SBEIDCO-1st International Conférence on Sustainable built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria),2009
- [3] T. Lucas, Les composites s'immiscent dans la B-TP. Ciments Français, 2005.
- [4] JF. Lataste , M. Behloul, D. Breyse, Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive. 25^erencontres de l'AUGC,23-25mai2007 bordeaux
- [5] C. Douthe, Etude de structures élancées précontraintes en matériaux composites : application à la conception des gridshells .Thèse de doctorat, école nationale des ponts et chaussées, 2007.
- [6] J. Renard, Elaboration microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymères. Lavoisier, 377, 2005.
- [7] CARMA, Glossaire des matériaux composites .CARMA –centre d'animation régional des matériaux avancés, France, 2006 .
- [8] J.-M. Berthelot, Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures. Tec & Doc, 642, 1999.
- [9] K. Abdou, Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire. Thèse de doctorat, université Mentouri-Constantine, 2007.
- [10] E. Rochdi, Contribution A L'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites. Thèse de doctorat, L'université Claude Bernard - Lyon 1,2002.
- [11] J.-P. Baïllon, J.-M. Dorlot, Des matériaux, Presses internationales polytechnique, 736,2000.
- [12] P. Casanova, Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure, thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.

- [13] M. Masmoudi , Amélioration des caractéristiques mécaniques du béton et du mortier par renforcement en fibres d'acier. Mémoire de magister ,université Biskra, 2008.
- [14] C. Zapata-Massot, Synthèse de matériaux composites par Co-broyage en voie sèche. Caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux. Thèse de doctorat , l'institut national polytechnique de Toulouse,2004.
- [15] L. Berreur, B.de Maillard ,S. Nösperger, L'industrie française des matériaux composites des :enjeux prioritaires pour un développement durable. Rapport final DiGITIP, 2002.
- [16] CIMBETON , Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre .Fiches techniques tome 2, centres d'information sur le ciment et ses applications, octobre 2006.
- [17] J. Baron, J-P. Ollivier, Les bétons: bases des données pour leur formulation. Eyrolles, 522,1997.
- [18] P.Ollivier, P. Margueres, JJ.Orteu ,Contrôle non destructifs des matériaux composites. Revue des composites des matériaux avancés, volume 17-n 2,2007.
- [19] S. Braïke, J.-P. Charron, B. Massicotte, Conception de ponts en bétons fibrés à haute et ultra haute performance. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton Toulouse, France 19-20 juin 2006.
- [20] A.Spasojevic O. Burdet A. Muttoni , Applications structurales du béton fibré à ultra-hautes performances aux ponts. Projet de recherche AGB 2000/555 Décembre 2008.
- [21] J.Newman,B.S.Choo. Advanced concrete technology. Editions Elsevier, 699p, 2003.
- [22] J.J Barrau, D.G. Egeorges , Structures en matériaux composites .Dossier Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence, bm5080, 2012.
- [23] V.M. Karhari. Use of composite materials in civil infrastructure in Japan . International Technology Research Institute , August 1998.
- [24] J. Luyckx , Composites à fibres de carbone dans le génie civil. Dossier Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence, am5620, 2012.
- [25]CARMA, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable. CARMA –centre d'animation régional des matériaux avancés –France, 2006.
- [26] M. Bentalha, Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. caractérisation - comportement monotone – microstructure. Thèse de doctorat, université Mentouri-Constantine, 2007.
- [27] Y. Fritih, Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton auto-plaçant armé. Thèse de doctorat, université L'INSA de Toulouse, 2007.

- [28] N. Makhoul, Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [29] Y.Wang , V.C.Li, S.Backer. Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar. *Cement & Concrete Composites* 12, 1990.
- [30] S.Hwang, P.S.Song, B.S.Sheu , Impact resistance polypropylene fibre reinforced concrete. *Journal of C.C.I.T.* Vol.32 No1, 2003.
- [31] P. Sukontasukkul, Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending. *Thammasat Int.Sc.Tech.*, Vol.9, No.3, 2004 .
- [32] A.Haouas. Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires-caractérisation et modélisation chmio-hydro-mecanique du retrait. Thèse de doctorat. Ecole normale supérieur de Cachan, 2007.
- [33] M. Ezziane, R. Jauberthie, T. Kadri . A. Bouhaloufa , Comportement mécanique des mortiers fibres a des températures élevées ."siczs_2010" symposium international sur la construction en zone sismique, université Hassiba Benbouali de chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.
- [34] M. Robert, P. Cousin, B. Benmokrane, Influence de la température sur le comportement des composites de prf pour le génie civil. *ORGAGEC' 08 matériaux organiques pour la construction : performances techniques et environnementales*, décembre 2008.
- [35] S.Bourbigot , R. Delobel, S. Duquesne, Comportement au feu des composites. dossier techniques de l'ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence compte 7200092269 - cerist193.194.76.512, juin 2012.
- [36] S. Sanyal, Fibre reinforced concrete: a new horizon in composite material. *Canadian Chemical News*, Jan 2009
- [37] J.J.Beaudoin, Béton renforcé de fibres. *Ciments Français*, 1982.
- [38] P .Rossi, Fibres métalliques ou fibres synthétiques .*Tunnels et espace souterrain* - n°218 , Mars/Avril 2010.
- [39] T. Vidal, Requalification des structures dégradées par corrosion des armatures. Thèse de doctorat , Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse , 2003
- [40] T. Hassaine Daouadji, M. Ait Amar Meziane, A. Tounsi, E.A. Adda Bedia , Réparation en flexion des poutres en béton armé par collage des lamelles en matériaux composites: effet d'orientation des fibres et des conditions d'environnement . *SBEIDCO –*

1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[41] P. Hamelin, Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. Dossier Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique de référence, am5615, 2012

[42] W. Merabet. Modelisation du comportement des poutres apres fissuration « tension stiffening effect mémoire de Magister en Génie civil, universite Mentouri Constantine, 2010.

[43] D. Redaelli, Comportement et modélisation des éléments de structure en béton fibré à ultra-hautes performances avec armatures passives .Thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2009.

[44] B. Boulekbache, S. Amziane, M. Chemrouk. Effet de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008.

[45] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, S. Amziane, Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[46] M. Bentalha, Etude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métallique sous chargement monotone croissant. Sciences & Technologie B – N°25, 51-58.2007.

[47] A.E. Naaman. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites .Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 3, 241-252,2003 .

[48] A.E. Naaman. High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan

[49] A. Mazzoni, Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire : effets du renforcement par des fibres minérales. thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.

[50] D. Sedan. Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment : Influence sur les propriétés mécaniques du composite