

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

ANNEE : 2019

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Etude expérimentale du comportement de poutres en béton armé et non armé renforcés de fibres métalliques ondulées soumises à la traction par flexion

Domaine : Sciences et Techniques

Spécialité :
GENIE CIVIL

Option :
Matériaux

Par :
El Mersni Adel
Boulebnane Adel

DIRECTEUR DU MEMOIRE : *Professeur Achoura Djamel*

DEVANT LE JURY

PRÉSIDENT : PROFESSEUR ARABI NOUREDDINE

EXAMINATEURS : DR MELAIS FATMA ZOHRA

Remerciements

*je remerciements à Monsieur le professeur Djamel
ACHOURA pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa
totale disponibilité. Ses remarques pertinentes, ses conseils
instructifs et ses lectures intensives m'ont permis d'améliorer
mon travail*

*Je remercie tous mes collègues que j'ai côtoyés au département Génie
Civil d'Annaba To, pendant ces de thème. Un grand merci à mes
amis : Walid ben mensour , Ala , Amel avec qui j'ai passé d'agréables
moments.*

*Pour finir, je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille
pour son encouragement*

RÉSUMÉ

Ce travail présente les résultats d'essai de compression et traction par flexion à trois points menés sur des poutres en béton témoin, béton fibré, béton fibré renforcée avec des armatures dans la zone tendue. Ces essais font partie d'un programme expérimental ayant pour but d'étudier l'influence des fibres d'acier ondulée sur l'apparition et la propagation de fissures, et ainsi sur le comportement ductile de ces bétons d'une manière générale, le comportement du béton témoin et le béton armé au zone tendue vis à vis de la fissuration est amélioré avec l'utilisation des fibres d'acier ondulée dans le mélange. L'addition des fibres d'acier ondulée réduit la fragilité du béton et améliore sa ductilité. Dans ce travail les essais sur les poutres en béton fibré et ferrillée seulement dans la zone tendue donne des meilleurs résultats par rapport les essais sur les poutres en béton armé notamment dans la résistance à la traction par flexion et la limite de l'ouverture des fissures d'une manière appréciable. D'un point de vue technique les résultats de notre travail nous permettent de remplacer les armatures passives par des fibres d'acier ondulée, et d'un autre point de vue économique les fibres d'acier ondulée moins cher que les armatures, et ne nécessite pas de main d'œuvres qualifiés pour l'incorporer dans le mélange du béton.

Mots Clés : Béton fibré. Fibres métalliques. Comportement mécanique

ABSTRACT

This work presents the results of three-point compression and tensile bending tests carried out on control concrete, fiber-reinforced concrete and reinforced fiber-reinforced concrete beams in the tensile zone. These tests are part of an experimental program with the aim of to study the influence of corrugated steel fibers on the appearance and propagation of cracks, and thus on the ductile behavior of these concretes. In general, the behavior of control concrete and reinforced concrete in the zone Strained with respect to cracking is improved with the use of corrugated steel fibers in the mixture. The addition of corrugated steel fibers reduces the brittleness of the concrete and improves its ductility. In this work the tests on the beams fiber-reinforced and ferro-reinforced concrete only in the tensile zone gives better results compared to the tests on reinforced concrete beams, particularly in the bending tensile strength and limit of crack opening in a significant way. From a technical point of view the results of our work enable us to replace the passive reinforcements by corrugated steel fibers, and from another economic point of view the Corrugated steel fiber is cheaper than frames, and does not require skilled labor to incorporate it into the concrete mix.

Key words: Fiber concrete. Metal fibers. Mechanical behavior

ملخص

يعرض هذا العمل نتائج اختبارات الانحناء والانحناء الثلاثة التي تم إجراؤها على الخرسانة الخرسانية والخرسانة المقواة بالألياف وعوارض الخرسانة المسلحة المقواة بالألياف في منطقة الشد، وتعتبر هذه الاختبارات جزءاً من برنامج تجريبي بهدف: دراسة تأثير الألياف الفولاذية المموجة على ظهور الشقوق وانتشارها، وبالتالي على سلوك الدكتايل لهذه الخرسانات، بشكل عام، سلوك التحكم الخرساني والخرسانة المسلحة في المنطقة يتم تحسين توترها فيما يتعلق بالتكسير مع استخدام ألياف الصلب المموج في الخليط. إضافة ألياف الصلب المموج يقلل من هشاشة الخرسانة ويحسن ليونة لها. في هذا العمل الاختبارات على الحزم الخرسانة المسلحة بالألياف والخرسانة المسلحة فقط في منطقة الشد تعطي نتائج أفضل مقارنة مع الاختبارات على عوارض الخرسانة المسلحة، لاسيما في قوة الشد الانحناء و الحد من فتح الشقوق بطريقة مهمة. من وجهة نظر فنية، تمكنا نتائج عملنا من استبدال التعزيزات السلبية بألياف الصلب المموج، ومن وجهة نظر اقتصادية أخرى ألياف الصلب المموج أرخص من التعزيزات ، ولا تتطلب عمالة ماهرة لدمجها في مزيج من الخرسانة **الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المسلحة بالألياف، الألياف المعدنية، السلوك الميكانيكي.

Sommaire

Remerciements

RÉSUMÉ

ABSTRACT

ملخص

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction généralea - b

I. CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralités sur le béton et le béton de fibres.....2

I.1.1 Généralités sur le béton.....2

I.1.2 Généralités sur le béton armé.....3

I.1.3 Généralités sur le béton renforcé de fibres.....3-4

I.1.4 Connaissance du matériau.....4-5

I.2 Différentes nature de fibres. 5

I.2.1 Fibres naturelles.5-6

I.2.2 Fibres minérales.6-7

I.2.3 Fibres organiques.7-8

I.2.4 Fibres métalliques..... 9-11

I.3 Propriétés des fibres 12

I.3.1 La notion de fibres structurales. 12

I.3.2 Le facteur d'élanement..... 12

I.3.3 La performance. 12

I.3.7 Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres..... 12

I.4 Utilisation des fibres dans le béton..... 13

I.4.1 Rôle des fibres dans le béton..... 13

I.4.2 Amélioration des caractéristiques mécaniques.....13-14

I.4.3 Contrôle de la fissuration de retrait 14

I.4.4 Avantages du béton fibré.....14-15

Sommaire

I.4.5	Domaines d'utilisation du béton de fibres.....	15-16
I.5	Comportement mécanique des bétons de fibres.....	17
I.5.1	Effet des fibres dans une matrice.....	17-18
I.5.2	Résistance des bétons de fibres en compression.....	19-21
I.5.3	Résistance des bétons de fibres en traction par flexion.....	22-25
I.6	Conclusion	26
II.	Chapitre 02: Matériaux et formulation des bétons	
	Introduction	28
	II.2. Matériaux utilisés	28
II.2.1.	Ciment	28-30
II.2.2.	Eau.....	31
II.2.3.	Granulat	31-36.
II.2.4.	Fibres	37
	II.3. Principe de formulations	38
II.3.1.	Formulation par méthode de Dreux-Gorisse	38-41
II.3.2.	Formulation des BFM	41-43
II.3.3.	conclusion.....	44
III.	Chapitre 03: Comportement mécaniques des poutres renforcées de fibres métalliques	
	III.1. Introduction.....	46
	III.2. résistance en compression.....	46
III.2.1.	Essai de compression.....	46-47
III.2.2.	Résultats et interprétation du test de compression.....	48-49
	III.3. Comportement mécaniques en flexion des poutres testées	50
III.3.1	procédure expérimentale.....	50-51
IV.	3.2 Charges (contraintes) – déplacement et Charges (contraintes) – ouverture de fissures.....	52-53
	III.3.3 Résultats du comportement mécanique en flexion des poutres d'étude.....	53-76
	III.3.4. Conclusion.....	77
	Conclusion générale.....	79-80
	Références bibliographiques.....	82-85
	Annexe	

Liste des Figures

<i>Designation</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Figure.I.1	Rôle des fibres dans la matrice de béton	5
Figure.I.2	Vue microscopique de fibres d'amiante	6
Figure I.3	Fibre de verre	7
Figure.I.4	Fibre de Carbone	8
Figure I.5	Différentes forme de fibres	10
Figure I 6	Géométrie des fibres métalliques	11
Figure I 7	Fissuration dans le béton sans et avec fibres	13
Figure I 8	Comportement de charge–déformation de béton sans et avec fibres	13
Figure I 9	Texture d'un béton fibré	14
Figure I.10	Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre	18
Figure I.11	Courbe contrainte deformation en compression simple	20
Figure I.12	Courbe contrainte deformation en compression simple (SERNA ROS, 1984)	21
Figure I.13	Influence du dosage en fibres lors d'uessai de compression	21
Figure I.14	Courbe contrainte déformation des essais de compression faits sur des éprouvettes as servies	21
Figure I.15	Diagrammes effort –déplacement en compression en fonction du type et du pourcentage en fibres	22
Figure I.16	Allure des courbes charge-flèche	23
Figure I.17	Vue du dispositif d'essai (machine Tribel OPM) [21]. Influence du type de fibres	24
Figure I.18	Influence de la longueur des fibres sur la résistance à la traction par flexion	25
Figure II.1 1	COURBE Granulométrique de sable et gravier	35
Figure II.13	COURBE Granulométrique de quatre fractions	36
Figure II.14	Mesure de la consistance Affaissement au cone d'ABRAMS	36

Liste des Figures

Figure II.16	Fibres métalliques ondulées utilisées	37
Figure II.18	recherche de la compacité optimale	43
Figure III.1	Essai de compression.	47
Figure III.2	Eprouvettes utilisées pour les tests de compression.	48
Figure III.3	Résistance en compression moyenne de béton témoin	49
Figure III.5	Mode de rupture en compression.	49
Figure III.6	Schéma de ferrailage des poutres	51
Figure III.7	la machine de traction par flexion trois point	52
Figure III.8	Détermination du déplacement en flexion	53
Figure III.9	Essai de flexion de la poutre en béton témoin	54
Figure III.10	Mode de fissuration et de rupture de La poutre en béton témoin	54
Figure III.11	Mode de fissuration de la poutre BT	55
Figure III.12	Mesure de la première et dernière fissure sur la poutre	55
Figure III.13	courbe charge- déplacement de la poutre Béton Témoin sans fibres	56
Figure III.14	Mode de fissuration de La poutre en béton Armé	57
Figure III.15	Mode de fissuration de La poutre en béton Armé	58
Figure III.16	les fissures sur la poutre en béton armé	58
Figure III.17	Première fissure sur la poutre armé	59
Figure III.18	dernière fissure sur la poutre armé	59
Figure III.19	courbe charge-ouverture de fissures de la poutre Béton Armé	59
Figure III.20	courbe charge- déplacement de la poutre Béton Armé	60
Figure III.21	Courbe contrainte traction par flexion-déplacement de la poutre Béton Armé	60
Figure III.22	Essai de Flexion sur la poutre en béton fibré	62
Figure III.23	Mode de fissuration de la poutre en béton fibré (apparitions de la fissure)	62
Figure III.24	Mode de fissuration de la poutre en béton fibré (développement de la fissure)	63

Liste des Figures

Figure III.25	mode de rupture sur la poutre en béton fibré (phase de rupture)	64
Figure III.26	Mesure de la première fissure sur la poutre en béton fibré	65
Figure III.27	Mesure de la dernière fissure sur la poutre en béton fibré	65
Figure III.28	courbe charge- déplacement de la poutre béton fibré	66
Figure III.29	courbe charge-ouverture de fissure de la poutre béton fibré	66
Figure III.30	Courbe contrainte en traction par flexion- déplacement de la poutre béton fibré	67
Figure III.31	Essai de flexion sur la poutre en béton fibré et ferrailé.	68
Figure III.32	Mode de fissuration de la poutre en béton fibré et ferrailé. (apparitions de la fissure)	69
Figure III.33	Mode de fissuration de la poutre en béton fibré et ferrailé (développement de la fissure)	69
Figure III.34	mode de rupture de la poutre béton fibré et ferrailé	70
Figure III.35	mode de rupture de la poutre béton fibré et ferrailé (phase de rupture)	70
Figure III.36	Mesure Première fissure sur la poutre en béton fibré et ferrailé.	71
Figure III.37	Me la dernière sure fissure sur la poutre en béton fibré et ferrailé	71
Figure III.38	Courbe charge- déplacement de la poutre béton fibré et ferrailé	72
Figure III.39	charge- ouverture de fissure la poutre béton fibré et ferrailé	72
Figure III.40	courbe contrainte traction par flexion- déplacement la poutre béton fibré et ferrailé.	73
Figure III.41	Courbe charge- déplacement de la moyenne des trois pouters	74
Figure III.42	Courbe contrainte en traction par flexion- type de béton	75
Figure III.43	courbe charge- ouverture de fissure moyenne des trois pouters	76

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante	6
Tableau I.1	Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	7
Tableau I.1	Propriétés mécaniques des fibres de carbone	8
Tableau I.1	Propriétés mécaniques des fibres de polymère	9
Tableau I.1	Facteur d'élanement	12
Tableau I.1	Domaines d'application privilégiés par type de fibres	15
Tableau I.1	Intérêt apporté par domaine d'application	16
Tableau II.1	constituants du ciment	29
Tableau II.2	Composition minéralogique du Ciment	29
Tableau II.3	Composition chimique du Ciment et du laitier	29
Tableau II.4	Caractéristiques physiques	30
Tableau II.5	Caractéristique mécaniques de ciment	30
Tableau II.6	l'analyse granulométrique de sable de carrière	32
Tableau II.7	l'analyse granulométrique de sable de dune	33
Tableau II.8	Composition granulométrique du gravillon 5/10	34
Tableau II.9	Composition granulométrique du gravillon 10/20	34
Tableau II.12	propriétés des bétons d'études l'état frais	35
Tableau II.15	Caractéristiques des fibres métalliques	37
Tableau II 17	Composition de béton d'étude	41
Tableau III.3	résultats de résistance en compression	48

1-Introduction générale

On peut situer la naissance des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM), en tant que Véritable matériau de construction, au début des années 60. Les travaux de Romuald. Sur L'arrêt de propagation des fissures dans une matrice fragile par des fibres réparties, [Romuald 1963] en sont à l'origine et ont conduit au dépôt d'un brevet. Depuis, les chercheurs se sont principalement intéressés au fonctionnement des fibres et à leur interaction avec la Matrice. Ces travaux ont été complétés avec succès par les industriels producteurs de fibres Qui ont développé des géométries et des matériaux constitutifs plus performants. Il est très vite apparu qu'en fonction de la fibre utilisée, de son dosage, de la qualité de la matrice mais aussi de la mise en œuvre, les propriétés obtenues pouvaient varier de manière significative.

Si on cherche à faire un bilan sur le plan de l'utilisation industrielle, on s'aperçoit que les fibres se sont imposées là où existaient des problèmes technologiques qui rendaient l'emploi du béton armé coûteux ou aléatoire. Les principales applications sont ainsi les dallages industriels, le béton projeté et les pieux forés. Prenons l'exemple du béton projeté en tunnel ou en canalisation. La solution traditionnelle consiste à fixer un treillis soudé à la paroi et à projeter un béton en couverture. Cependant, la pose du treillis est longue et coûteuse, et cette technique peut entraîner des défauts de remplissage dans la mesure où le treillis fait écran au béton. Le béton projeté de fibres métalliques est donc, dans ce cas, une solution à la fois économique et de meilleure qualité.

Il convient de noter que ces applications concernent des domaines où le support est un garant de la sécurité. Cette situation a permis de se satisfaire de l'empirisme qui préside à l'utilisation de ces matériaux. Néanmoins, l'utilisation accrue des BFM ainsi que la volonté d'étendre leurs Domaines d'utilisation posent le problème du dimensionnement des structures. Ceci explique Que. Malgré un nombre important d'essais réalisés sur des éléments de structures porteurs, peu D'applications ont vu le jour au plan industriel.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail dont l'objectif est d'analyser, dans le cas de la structure élémentaire qu'est la poutre, les particularités liées à l'emploi des BFM. Considérons les étapes de construction d'un élément de structure. Une fois défini le cahier des charges de cet élément, il convient de le dimensionner. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une caractérisation adéquate du matériau qui puisse être considérée comme intrinsèque, ainsi que d'outils de calcul. Il faut ensuite fabriquer l'élément, ce qui constitue

Introduction Générale

une étape fondamentale puisque la mise en œuvre conditionne la répartition des fibres, donc la réponse du matériau. Ces trois étapes sont intimement liées dans le cas des BFM.

En conséquence, l'élaboration d'une méthode de calcul ne peut se faire que parallèlement à

une étude expérimentale poussée. Cette étude doit en particulier permettre d'établir :

- les mécanismes qui entrent en jeu pour une sollicitation donnée,
- les paramètres du comportement des matériaux qu'il est nécessaire de déterminer,
- une validation des modèles proposés.

Le premier chapitre de cette thèse est dédié à l'étude bibliographique qui concerne la caractérisation des différents constituants entrant dans la formulation des bétons à ordinaires, ainsi leurs mécanismes d'action. Nous nous sommes ensuite fait le point sur les travaux réalisés sur les bétons fibrés ou nous avons vu que ces derniers permettaient d'améliorer le comportement mécanique du matériau. Les études faites sur les déformations instantanées et différées sont également présentées. Elles sont accompagnées des diverses recherches réalisées sur les propriétés physico-chimiques ou en terme plus large des BT sans et avec fibres.

Le deuxième chapitre a pour objectif de définir et de justifier nos choix de base en ce qui concerne les compositions des matériaux étudiées. Une optimisation de la formulation des BT sans et avec fibres a été faite on se basant sur plusieurs méthodes et approches de formulations. Ce chapitre se termine par une présentation des résultats d'essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature du dosage en fibres métalliques sur propriétés des BT à l'état frais.

Le troisième chapitre, concerne la caractérisation mécanique (résistance mécanique en compression, en traction par flexion et ouverture de fissure) des Béton non armé et béton armé et béton fibré et béton fibré et ferrailé avec des fibres ondulées.

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction : Ce chapitre est réservé à la « recherche bibliographique » pour établir une documentation afin d'acquérir de la connaissance.

1.1. GENERALITES SUR LE BETON ET LE BETON FIBRE

1.1.1. Généralités sur le béton

Taille de grains comprise entre 1 et 5 mm et les granulats ou graviers de grosseur Comme il est d'usage le béton est réalisé à partir des composants principaux qui sont: le ciment, l'eau et les granulats. Le ciment constitue la phase liante du béton, avec une taille de grains comprise entre 1 et 100 micromètres; le Sable, avec une comprise entre 5 et 25mm.

Les romains le confectionnaient à partir de la chaux, de céramique écrasée et de sable volcanique (Vitrais "de Architectura" 1er siècle av. J.C.). Le Panthéon de Rome, an 124 après J.C., est couvert par une gigantesque coupole en béton [1].

Il existe dans la nature sous forme de poudingues calcaires et siliceux, mais c'est aussi un matériau qui est mis en œuvre par l'homme d'abord d'une manière pragmatique dans la maçonnerie romaine qui était faite de cailloux noyés dans un mortier, puis de manière plus scientifique à partir du 19^{ème} siècle.

Aujourd'hui, il est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de construction, qu'il s'agisse du bâtiment ou des ouvrages d'art comme les ponts ou barrages ou encore dans les pistes d'atterrissage ou jetées de ports.

Si le matériau est plastique donc modulable lors de sa fabrication, il acquiert ses propriétés mécaniques au cours du temps. Une fois mature, le béton doit être considéré comme un composite constitué de granulats et d'une pâte de ciment durcie, dont les propriétés dépendent, en grande partie, de sa formulation.

L'évolution des connaissances du matériau, les exigences nouvelles en matière de propriétés ont incité les chercheurs et les industriels à introduire dans les formulations de nouveaux produits afin d'obtenir des propriétés recherchées. Ainsi, actuellement, assiste-t-on à une large variété de gammes de bétons pour répondre à la forte demande des industriels.

S'appuyant sur les connaissances de ces nouveaux matériaux, les maîtres d'œuvre proposent des ouvrages innovants. Il s'agit là de réaliser des ouvrages avec des compositions de béton répondant aux critères exigés définis pour chaque ouvrage [1].

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.2. Généralités sur le béton armé

La mise en place du béton armé est affectée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé et à Joseph Monier, qui construisait indépendamment grâce à ce matériau, des bacs à fleurs en 1849. L'emploi du béton armé dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de François Hennebique et de Armand Gabriel qui considèrent dès 1906, une circulaire ministérielle fixe des instructions relatives à l'emploi du béton armé, codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Un nouvel essor est apporté par l'invention vers 1930, du béton précontraint par Eugène Freyssinet. Un pas conceptuel important est alors franchi, qui a constitué une véritable révolution dans l'art de construire, tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton [2].

I.1.3. Généralités sur le béton renforcé de fibres

L'idée de renforcer le béton avec des éléments courts en acier de type fibres n'est pas récente, elle date depuis l'antiquité. D'après le chercheur Exode [3,4], les Egyptiens ont utilisé les pailles pour renforcer la brique de boue. Il y a aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile en Finlande, il y a de cela 5000 ans [3]. Dans d'autres sources [4,5], il a été indiqué que les pailles ont été utilisées pour renforcer les briques, tandis que les poils d'animaux et les fibres d'amiante ont été introduits pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment Portland. On peut noter aussi la réalisation au milieu du XV^e siècle d'alliages métalliques avec des fibres de carbone.

M. BRAUN et d'autres chercheurs [6], ont rapporté que la paille a été rajoutée dans Des matériaux de construction tels que le mortier,
Le plâtre...etc.

JOSEPH LAMBOT [4] en établissant en 1847 un brevet, suggère l'ajout de fils continus ou de treillis métalliques pour créer un nouveau matériau qui peut être, à son avis, une solution face aux problèmes de fissuration des bétons. Ces développements sont à l'origine de la technologie actuelle du béton armé.

Ce concept conduit toutefois à un matériau anisotrope dans lequel les armatures continues qui ne travaillent que dans une direction privilégiée, et sont relativement inefficaces face aux fissures microstructurales.

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Vingt-sept ans après, l'américain A. BERNARD [4] est parvenu en Californie (U.S.A), à créer une pierre artificielle par l'ajout des granulats en fer recuit dans un mélange de béton. Ensuite, en 1899, un processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante a été mis au point par LHATSHELs.

Pour améliorer la résistance du béton, une série d'essais a été faite par J. PORTER en 1910, [7], qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Par la suite une série de brevets ont été établis par J. GRAHAM (1910), WEAKLY (1912), FICKLEY (1914).

La fin des années soixante a connu la participation d'un grand nombre de chercheurs afin d'orienter les axes de recherche vers l'application, avec toute la fiabilité du béton de fibres dans les domaines de construction. Les travaux se multiplient et une multitude de types de fibres a été introduite dans le commerce comme étant de nouvelles applications. Le plus grand progrès dans ce domaine a commencé dans les années soixante-dix avec l'incorporation des fibres d'acier dans l'industrie réfractaire.

A partir de l'année 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres. L'amélioration de certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres a permis leur utilisation de façon permanente dans des applications industrielles. Mais aujourd'hui, avec le développement des moyens expérimentaux, l'utilisation de ce type de matériaux s'est orientée vers les structures présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons traditionnels.

Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS [8]. Dans cet article, ces auteurs confirment que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

I.1.4. Connaissance du matériau

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de couvrir les microfissures (voir fig.I.1). Une pièce en béton armé renforcée à l'aide d'une couche en béton de fibres permettrait d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi protègent les armatures traditionnelles). Il existe maintenant trois gammes de fibres utilisées pour des applications très différentes : métalliques, macro fibres synthétiques et microfibres polypropylènes [9].

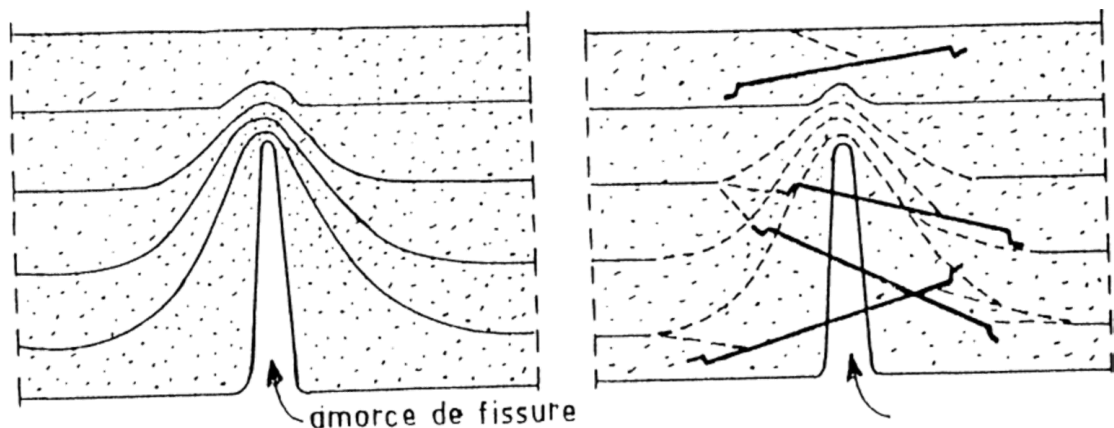


Figure 1.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton [9].

1.2. DIFFERENTES NATURE DE FIBRES

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées

1.2.1. Fibres naturelle :

❖ Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois) [10].

1.2.2. Fibres minérales :

❖ Fibres d'amiante :

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 en fait, des bûchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux microorganismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur [11].



Figure 1.2 : Vue microscopique de fibres d'amiante [11]

Tableau 1.1: Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante [11].

Type de fibre	Amiante
Diamètre D (mm)	0.0002 - 0.002
Longueur (mm)	5
Masse Volumique ? (g/cm ³)	2.6 - 3
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	100 - 300
Module d'Young E (GPa)	80 - 150

Fibres de verre :

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μ m. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice ;
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

- Conductivité thermique relativement faible [11].



Figure 1.3 : Fibre de verre [11].

Tableau 1.2 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [11].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique ? (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

❖ **Fibres de carbone :**

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes.

Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur. On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres.

- les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module),
- les types hautes résistances soient les classes I THR ou VHS (Très haute résistance ou very high strength) et HR ou HS (haute résistance ou high strength)

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [12].

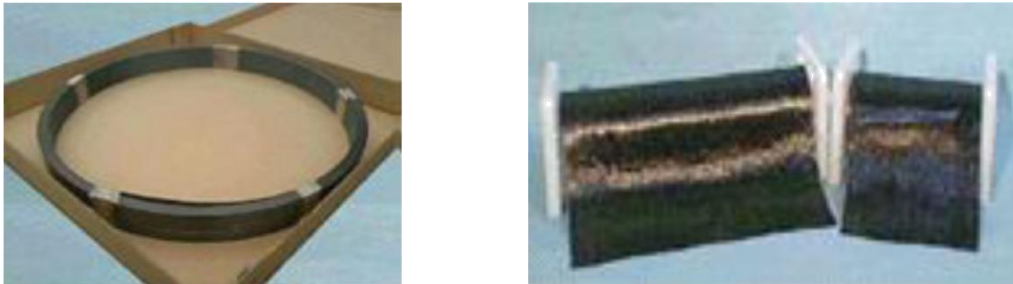


Figure 1.4 : Fibres de carbone [12]

Tableau 1.3 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone [12]

Type de carbone	H.R.	H.M.
Diamètre D (mm)	8	8
Masse Volumique ? (g/cm ³)	1.75	1.81
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	3000 - 5000	2800
Module d'Young E (GPa)	220	400

1.2.3. Fibres synthétiques :

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir [12]:

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

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

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC, PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton [12].

De ce fait, de récentes études menées sur des bétons renforcés par ce type de fibres ont montrés que ce matériau composite présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verre [12].

Tableau 1.4 : Propriétés mécaniques des fibres de polymère [16].

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

1.2.4. Fibres Métalliques :

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde.

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressé à la fibre métallique (acier), vue les caractéristiques (forme, élancement, caractéristiques physico-chimique...etc.) qu'elles présentent.

L'ajout des fibres au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $L_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure.

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres :

- fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc...[14].



Figure 1.5 : Différentes forme de fibres [14].

❖ Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité très élevé [15].

Parmi les fibres d'acier les plus utilisées nous citons :

✓ Les Fibres Euro-Steel

Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilé, dur, à teneur en carbone inférieure à 0.15%. La contrainte limite de rupture en traction est de 1400 MPa[12].

✓ Les Fibres Bekaert de Chez Dramix

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert. Elles se présentent sous forme de plaquettes collées, ce qui facilite leur introduction dans le béton et évitent la formation d'oursins. En effet, la colle se dissout facilement dans l'eau de gâchage.

Les fibres les plus courtes sont actuellement utilisées en béton projeté. Elles ont une résistance à la traction minimale de 1100 MPa. Leur diamètre varie de 0.4 à 0.8 mm et leur longueur de 25 à 60 mm [12].

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

✓ Les Fibres Harex

La fibre Harex est obtenue par fraisage. Les copeaux, produits légèrement enroulés sur eux-mêmes, possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPa[12].

✓ Les fibres Ruban en Fonte Amorphe de Pont-à-Mousson

Ces fibres sont développées par SEVA (Pont à-Mousson), sont des rubans de fonte amorphe obtenue par refroidissement brutal. Cette trempe crée une structure vitreuse qui est en partie à l'origine de sa résistance à la corrosion.

Les longueurs commercialisées de ces fibres sont de 15, 30, 45 et 60 mm Une de leurs caractéristiques importantes est leur grande résistance à la corrosion. La résistance à la traction de ces rubans est d'environ 200 MPa.

✓ Les Fibres à Tête d'encrage en Acier Trfile

Ces fibres sont développées par EURO-STEEL, elles se distinguent par leur capacité à l'angle d'inclinaison des têtes a été choisi pour permettre un confinement du béton [12].

✓ Les Fibres de Beki -Shield

Ce sont des fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki-Shield, présentent des caractéristiques intéressantes, elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre.

Ces fibres sont fabriquées à partir d'un acier inoxydable qui offre de très grande résistance à la corrosion [17]. D'autre part. DEBICKI [16].résume sur le tableau 1.4 quelques propriétés de fibres industrielles .Il met en évidence la nature très variée de ces fibres.

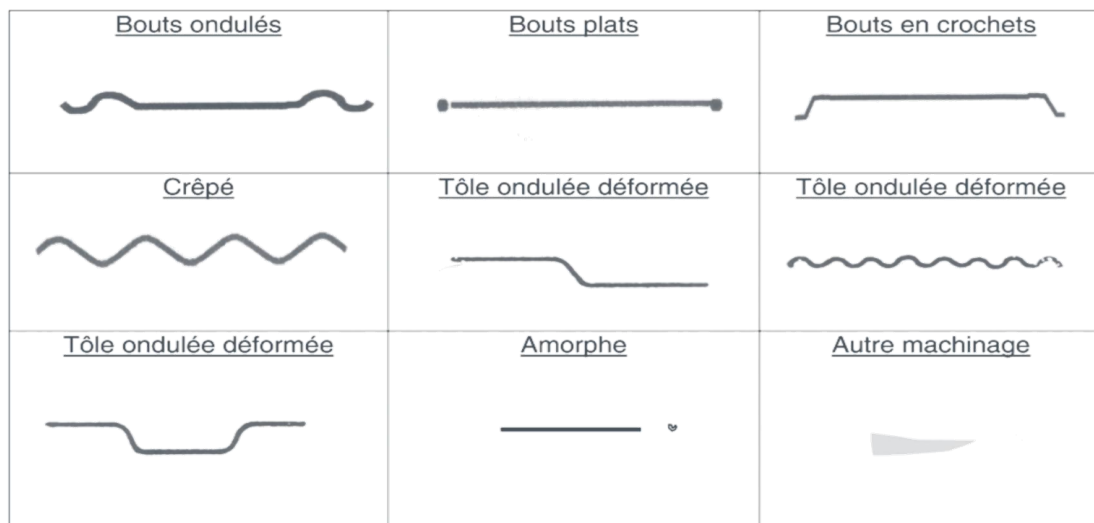


Figure 1.6 : Géométrie des fibres métalliques [12].

1.3 PROPRIETES DES FIBRES

1.3.1 La notion de fibres structurales

La notion de fibres structurales n'est applicable qu'à certains types de fibres métalliques pour lesquelles les résistances résiduelles s'apparentent à l'action structurale des armatures traditionnelles. Il est important de réaliser que le terme « fibre structurale » est inapplicable à la plupart des types de fibres.

Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les microfibrilles synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis [18].

1.3.2 Le facteur d'élançement

Le facteur d'élançement est défini par un ratio géométrique. Le facteur d'élançement est donc le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre. Le tableau 4-2 indique des valeurs de ratio pour certains types de fibres.

Le lien entre la matrice du béton et la fibre augmente proportionnellement avec le facteur d'élançement. Par contre, les fibres avec un facteur d'élançement supérieur à 60 et dotées d'une géométrie particulière sont potentiellement susceptibles de former des « oursins » [18].

Tableau 1.5 Facteur d'élançement. [18].

Types de fibres	Élançement (L/D)
Macrosynthétiques	50-100
Métalliques	25-100
Fonte amorphe	1200-1400
Polypropylène	140-1700
Carbone	150-400

1.3.7 Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres

Les fibres ont un rôle qui se traduit par des résultats variables, donc des applications différentes en fonction de leur nature. Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

Selon leur type, les fibres métalliques, synthétiques ou naturelles ont une influence différente sur les propriétés du béton durci.

Le type de liant utilisé dans le béton, la géométrie et la composition des fibres, ainsi que leur orientation, leur distribution et leur densité à travers le béton, sont des facteurs qui influencent les propriétés du béton frais et durci [18].

1.4. Utilisation des fibres dans le béton

1.4.1 Rôle des Fibre dans le Béton

Dans les premières études, les chercheurs ont essayé, par l'incorporation de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais les résultats obtenus n'étaient pas ceux escomptés [18].

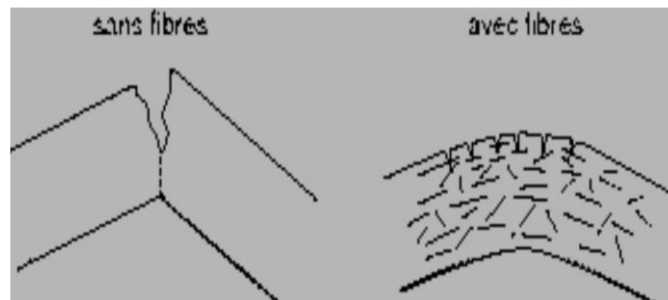


Figure 1.8: Fissuration dans le béton sans et avec fibres [18]

Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels:

- le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la figure 1.8.
- la transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure 1.9. [18].

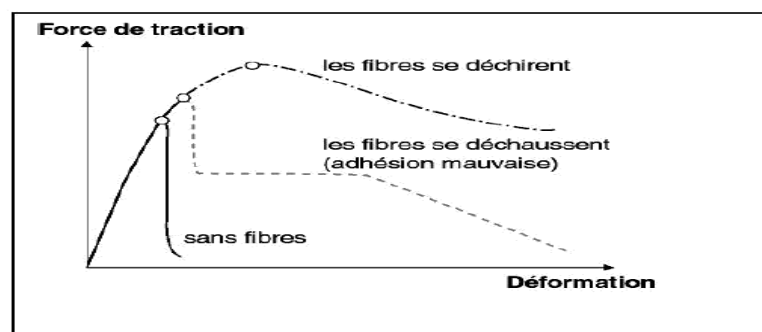


Figure 1.9: Comportement de charge-déformation de béton avec et Sans fibres [18].

1.4.2 Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post-fissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

Il faut combiner tout apport de fibres dans le béton à des techniques d'insertion des fibres permettant d'éviter la formation « d'oursins ».

1.4.3 Contrôle de la fissuration de retrait

Selon l'efficacité du type de fibres utilisé, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post-fissuration.

Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat (figure 1.10). L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.

Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu [18].



Figure 1.10 Texture d'un béton fibré [18].

1.4.4 Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique [18].

✓ Aspect technique.

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Les principaux avantages techniques sont :

- un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
- une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post-fissuration (résistance résiduelle) ;
- une énergie d'absorption élevée ;
- une résistance aux impacts élevée ;
- une résistance à la fatigue élevée ;
- une augmentation de la résistance en cisaillement.

✓ **Aspect économique.**

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction ;
- une optimisation du dimensionnement.

1.4.5 Domaines d'utilisation du béton de fibre

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles.

Tableau 1.6 : Domaines d'application privilégiés par type de fibres [18].

<i>Domaines d'application privilégiés par type de fibres</i>			
<i>Type de fibres</i>	<i>Dosage courant</i>	<i>Domaine d'application privilégié</i>	<i>Exemples d'application</i>
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	<ul style="list-style-type: none"> – Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression – Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux – Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement – Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	<ul style="list-style-type: none"> – Dallage – Voussoirs de tunnels – Revêtement d'ouvrages souterrains – Mortiers projetés – Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	<ul style="list-style-type: none"> – Parements architectoniques – Panneaux de façade – Éléments décoratifs

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.7 : Intérêt apporté par domaine d'application

APPLICATIONS	INTERET APORTE PAR L'ADJONCTION DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges. - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.
Dallage, chaussées en béton, dallages manufacturés, et tous éléments structurés et tous éléments structuraux soumis à la flexion.	<ul style="list-style-type: none"> - 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...etc.).	<ul style="list-style-type: none"> - amélioration de la charge ultime, pas de rupture catastrophique
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles ex: piste d'aéroport.	<ul style="list-style-type: none"> - l'énergie absorbée est plus importante, - la durée de choc est augmentée, - la loi de comportement du matériau est fortement modifiée
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts.	<ul style="list-style-type: none"> - amélioration de la résistance aux chocs, - amélioration de la déformation

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

Parties exposées aux fortes variations de température et même aux hautes températures.	- remplacement avec succès du revêtement réfractaire, - diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Fabrication des pieux, revêtement ignifuges isolants (construction navale). Panneaux de revêtement de façade....etc.	- augmentation de la résistance aux chocs, - augmentation de la résistance à l'usure, augmentation de la durabilité de revêtement
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	- évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé, - diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.

1.5. COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES

1.5.1. Effet des fibres dans une matrice

□ □ La taille et la rugosité des granulats

La dimension des granulats est très importante pour avoir un bon béton résistant et maniable car avec une présence d'une certaine quantité de gros grains, le béton peut avoir une mauvaise ouvrabilité.

Les B.R.F sont composés, en plus des gros granulats, d'une quantité de fibres, qui en entrant en contact avec ceux-ci tend à figer leur mouvement, fait qui se répercute principalement sur la maniabilité.

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des B.F.M. est souvent difficile et a toujours posé d problème.

Ainsi pour Faciliter cette mise en œuvre, la composition du béton ne doit en aucun cas Contenir des éléments dont la taille est supérieure au quart de la longueur de la fibre (une

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

dimension maximale d'environ 8 à 15mm), c'est la raison qui fait que les bétons de sable se révèlent compatibles à l'inclusion des fibres [3].

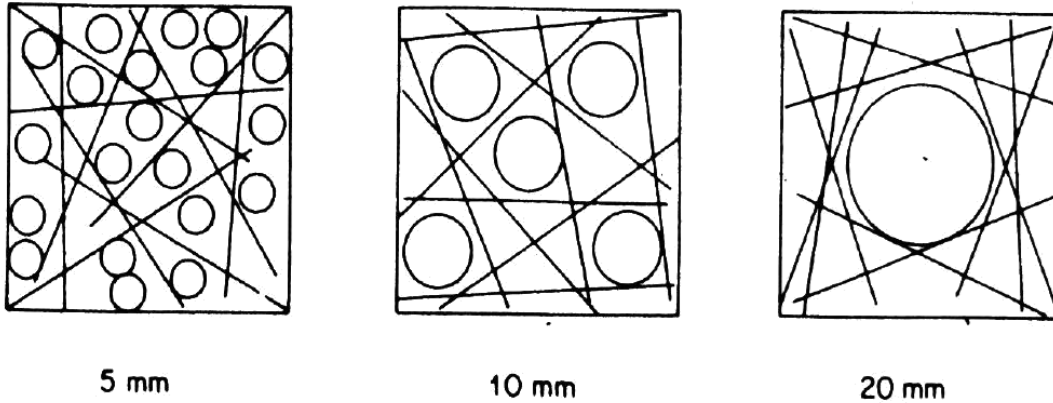


Figure 1.11 : Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre [3].

❖ Influence de l'adhérence fibres matrice

L'adhérence fibres - matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice, l'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons:

- une liaison élastique,
- une liaison de frottement,
- une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets ondulation dentelles).

Des essais d'arrachement effectués par Eurosteel sur les fibres ondulées (1982) montrent que la résistance d'adhérence dépend de la teneur en ciment dans la matrice. Il existe une teneur en ciment voisine de 400 à 500 Kg/m² [6].

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

❖ Influence de la géométrie de la fibre

Plusieurs types de fibres ont fait l'objet de beaucoup de recherches, mais il est prouvé que les seuls types de fibres susceptibles d'augmenter la résistance à la traction du béton, par la transmission d'une palpable énergie de plastification et de rupture, sont celles dotées d'un système d'ancrage. Les deux prérogatives qui en découlent sont :

1. En se plastifiant, l'ondulation diffuse, dans le béton, une énergie capable de multiplier par 2.5 celle de la rupture en traction de la fibre.
2. Contrairement aux autres types de fibres, celles ondulées sont capables de s'agripper au béton. En effet, l'existence d'ondulations le long de ces fibres créent des réactions de butées et s'opposent par le fait au déchaussement de ces fibres[6].

❖ Mécanisme de rupture d'une fibre dans la matrice

La résistance à la fissuration et la résistance ultime du composite dépendent du transfert des efforts matrice- fibre. Lorsque la fibre est soumise à un effort d'arrachement, le transfert des charges à l'interface s'effectue par les contraintes d'adhérence. La distribution de ces contraintes le long des parties ancrées des fibres associées aux modèles de comportements utilisés peut être éventuellement confirmée par des essais simples comme celui de «pull-out».

❖ Processus de fissuration dans le béton

Lors de la propagation d'une fissure dans le béton renforcé de fibres, le processus de fissuration doit être le suivant :La fissure qui se propage tout d'abord dans le mortier est arrêtée par une fibre qu'elle rencontre figure I.5-a,l'énergie nécessaire pour rompre l'interface étant trop importante ,la fissure repart derrière la fibre de sorte que celle-ci joue un rôle de couture de la fissure figure I.5-b. Finalement la rupture du composite survient soit par arrachement soit par rupture des fibres figure I.5-c[2,7].

1.5.2. Résistance des bétons de fibres en compression

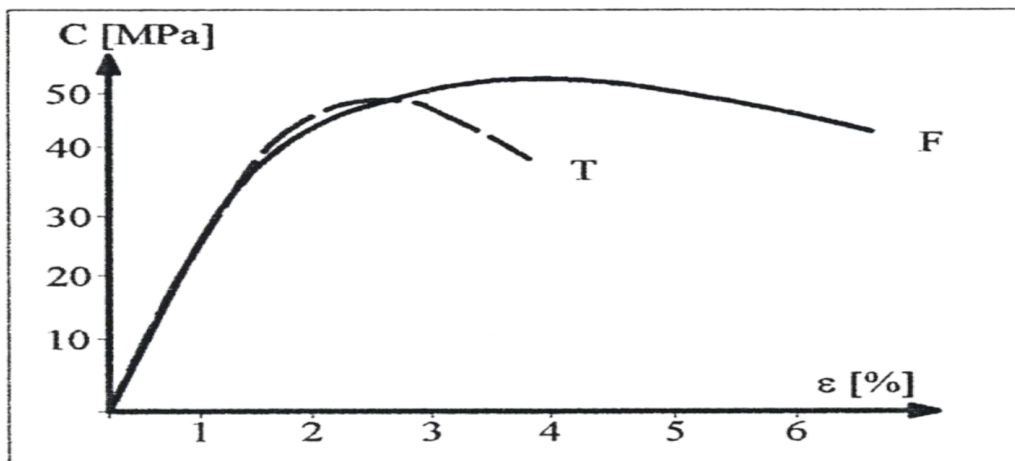
Le comportement en compression du béton renforcé de fibres se résume en trois phases qui sont les trois parties indissociables du diagramme effort-déformation:

- La première phase, avant microfissuration, est traduite par une partie linéaire de la courbe, - Effort - déformation : celle-ci est identique à celle du béton témoin pour toute valeur de l'effort inférieure à 50% de la charge de

-La moyen de trois éprouvettes cubiques rupture. Cela nous permet de dire que le module de Young est insensible à la présence des fibres durant cette phase.

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

- La seconde phase est représentée par un diagramme courbé, durant laquelle la courbe relative à un BFM commence à se démarquer de celle du béton témoin. Ceci est dû à l'amorçage des microfissures et par conséquent la mise en service des fibres qui se mettent en tension.
- Dans la dernière phase, qui va dans une direction descendante, les fibres reprennent la quasi- totalité de l'effort tout en maintenant le béton fissuré, en un seul bloc.
- D'après SERNA ROS(1984), la résistance ultime et le module d'élasticité d'un BFM sont très proches de ceux du béton témoin. Néanmoins, les fibres nourrissent le béton, au-delà du pic, d'une énergie, produisant ainsi un comportement ductile et corrélativement une augmentation de la déformation à la rupture voir figure 1.14.



**Figure 1.14: Courbe contrainte déformation en compression simple
(SERNA ROS, 1984) [19].**

Avec :

T : Béton de fibres

F : Béton de fibres métalliques à crochets, différentes compositions de matrices sont testées.

Dans cette optique, FENELLA.D.A et AL (1985) ont montré, de par l'expérience, que plus le dosage en fibres est considérable, plus la dispersion de la partie descendante de la courbe effort-déformation est significative. La figure qui suit nous montre que le renforcement du béton par des fibres se retrouve sensiblement plus résistant, et nettement plus ductile [19].

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

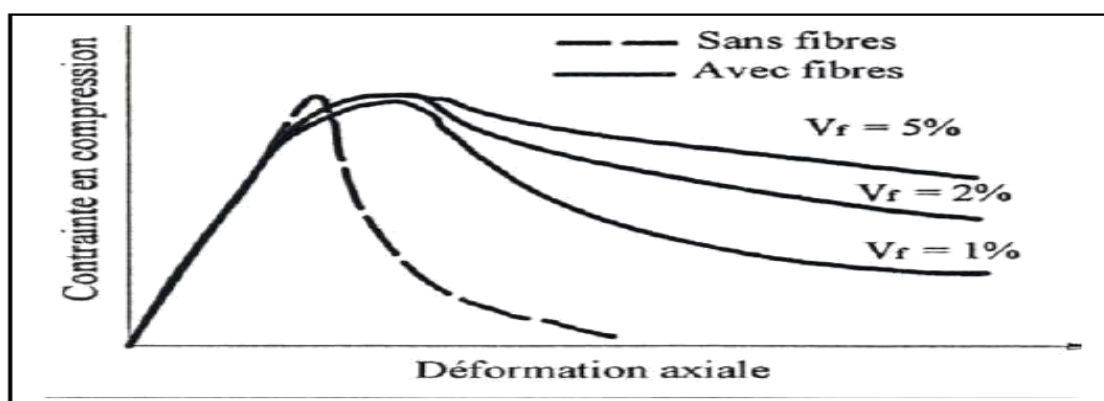


Figure 1.15: Influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression [3].

A l'évidence, ZHAN (1991), a montré que les fibres métalliques dans le béton (comparativement à un béton témoin) augmentent sa résistance de 20%. Dans la série d'essais qu'il a entrepris sur des éprouvettes asservies avec un âge de 227 jours. Il a constaté que ce plus en résistance est beaucoup plus faible (de l'ordre de 7%) [19].

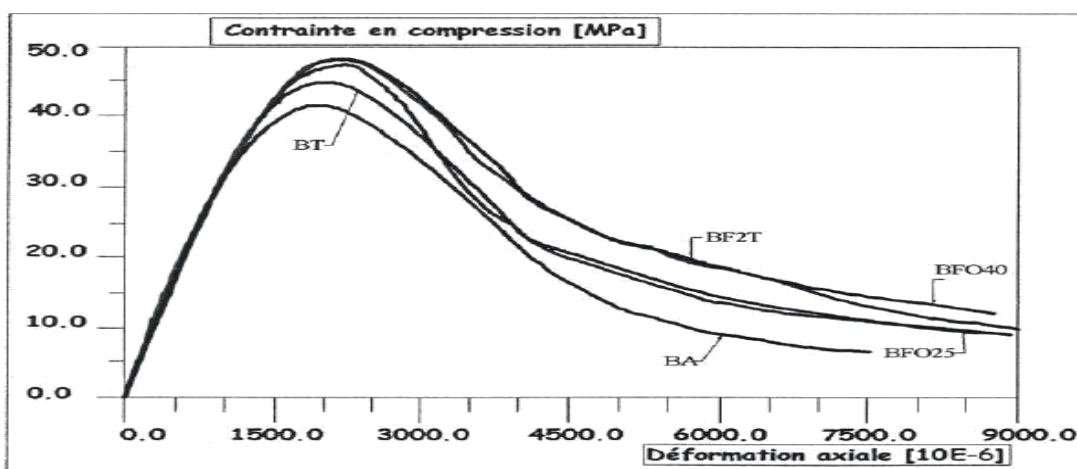


Figure 1.16: Courbe contrainte déformation des essais de compression faits sur des éprouvettes asservies [19].

Dans le but d'affûter les résultats, des essais de compression ont été réalisés au LCPC, en prélevant par sciage, des éprouvettes de dimensions 10x10x10 cm³ d'un gros massif de béton de fibres DRAMIX, un autre à base de fibres FIBRAFLEX et comme à l'accoutumée un béton témoin servant de référence.

Il n'est admis que l'ajout de fibres n'améliore en rien la résistance d'un béton à

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

La compression, on observe une diminution du module de Young ainsi que la contrainte. Toutefois la ductilité, qui dépend du type et de la géométrie de la fibre mais aussi du pourcentage en fibres, se trouve accrue voir figure 1.17 [20]

Pierre ROSSI quant à lui a choisi, pour expliquer cette baisse en résistance, d'emprunter un chemin plus simple, en se servant des formules de FERET. Selon lui, la chute de la résistance et du module de Young des BFM s'explique que celui-ci contient une quantité plus considérable de sable et de pâte de ciment que celle d'un béton ordinaire, mais aussi à cause d'une porosité plus élevée [20].

En tout état de cause, le fait de ne pas considérer la quantité de gravier en moins dans un BFM, identifiée par rapport à un béton sans fibres pourra d'une manière ou d'une autre fausser nos résultats [20] Il est à rappeler que dans cette étude, les chercheurs du LCPC ont accordé une grande importance à l'utilisation de la méthode Baron-Lesage en ciblant la substitution, par les fibres, des armatures transversal.

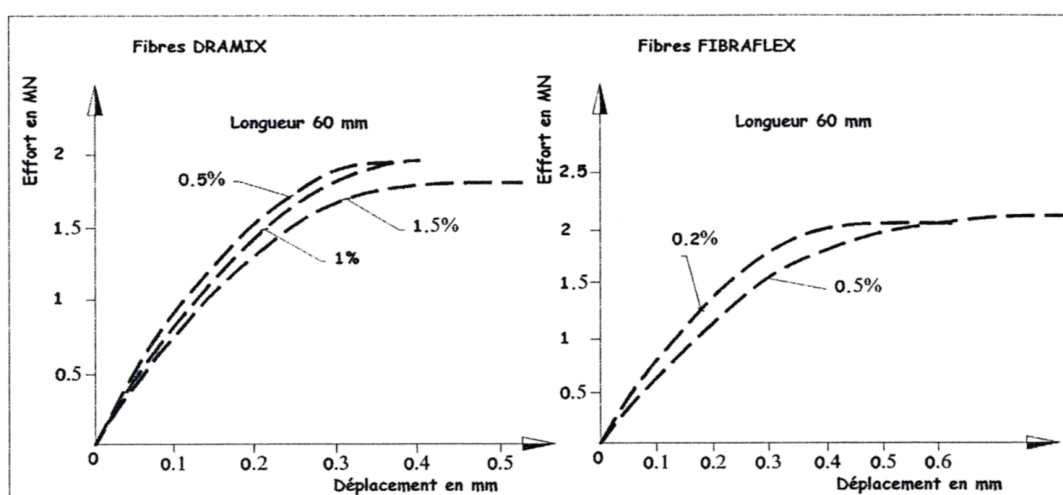


Figure 1.17 : Diagrammes effort -déplacement en compression en fonction du type et du pourcentage en fibres [20].

.5.3. Essais de traction par Flexion

Le béton testé au cours de cette étude [21] est renforcé de fibres de ondulée et les fibres d'acier ondulée de longueur 50 mm et 30 mm des poutres sont dimensions 150x200x1200 mm, ils sont soumis à l'essai 28 jours après le coulage. Ils reposent sur deux appuis distants de 1000 mm (centrés) et sont soumis à une charge verticale, appliquée au milieu de la travée centrale. La charge est appliquée progressivement à vitesse de chargement contrôlée (machine d'essai Tribel OPM200), voir figure I.12, et ce jusqu'à la rupture pour chaque type de béton.

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

La courbe charge-flèche est ensuite enregistrée.

L'allure des courbes obtenues, lors de l'essai de traction par flexion des éprouvettes, est donnée à la figure 1.18.

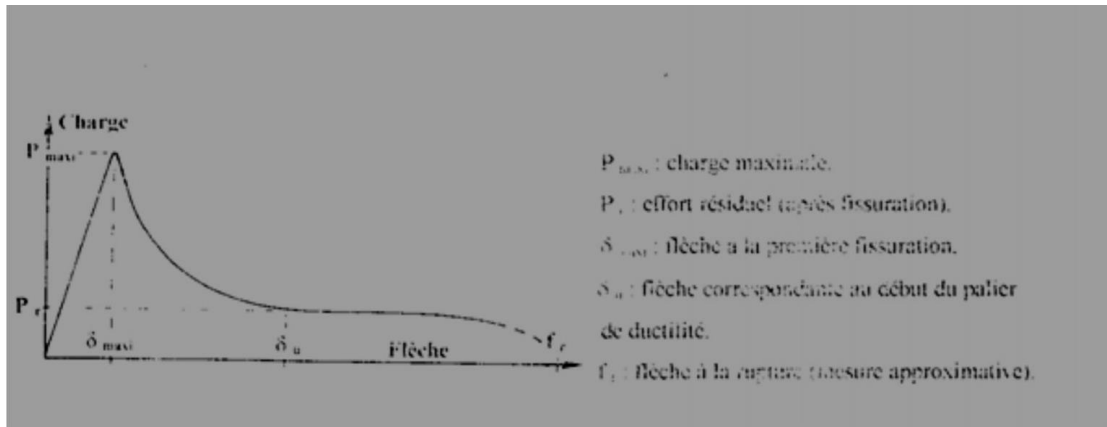


Figure 1.18 : Allure des courbes charge-flèche [21].

La courbe comporte une première phase, élastique linéaire jusqu'à atteinte de l'effort maximal correspondant à l'apparition de la première fissure. Cet effort maximal est fonction du pourcentage en fibres. La deuxième phase est caractérisée par une branche descendante plus au moins ductile. A ce stade, les fibres sont

sollicitées en traction. Elles interviennent en "causant"

les fissures et en limitant leur ouverture. La longueur des fibres ainsi que le pourcentage deviennent des paramètres importants. En effet, l'effort nécessaire à l'arrachement des fibres est fonction de la longueur adhérente et du système d'ancrage (crochets pour les fibres Dramix). En ce qui concerne le pourcentage, plus celui-ci est important plus le nombre de fibres cousant la matrice est important.

Enfin, dans la troisième phase, la courbe tend à s'aplatir et ne s'annule qu'après une grande déformation. Il y a une réduction des efforts due à l'existence des fibres au niveau de la fissure. Cet effort qui permet au matériau de résister encore est appelé effort résiduel. La rupture survient ensuite soit par arrachement, soit par rupture des fibres [21].

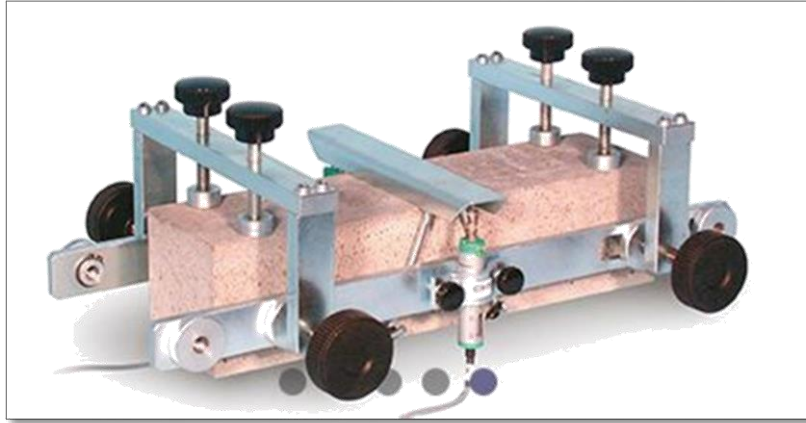


Figure 1.19: Vue du dispositif d'essai (machine Tribel OPM) [21].

❖ Influence du type de fibres

Le comportement global des éprouvettes de deux types de béton (béton armé de fibres et béton armé de fibres locales, en copeaux, de longueur de 30 et 50 mm, avec des pourcentages de 0,5 et 1%) est sensiblement le même pour les deux types d'éprouvettes.

L'ajout des fibres au béton apporte une certaine ductilité. Pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1% , le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres (pour $l_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités.

L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure [21].

❖ Influence de la longueur des fibres

Avec le béton de fibres en copeaux, pour des pourcentages 0,3; 0.5 ; 1 ; 1,5 ; 2 et 2,5%, et des longueurs de 30 et 50 mm, on peut conclure que pour les faibles pourcentages, la longueur n'affecte que très peu le comportement des éprouvettes en traction. Par contre, plus le pourcentage augmente, plus l'effet de la longueur des fibres n'est important. A pourcentage égal, les fibres les plus longues sont plus efficaces pour couvrir les fissures. L'effort nécessaire à l'arrachement des fibres ainsi que l'énergie de rupture sont plus importants.

❖ Influence du pourcentage en fibres

La figure I-13 montre l'influence du pourcentage en fibres sur le comportement des éprouvettes soumises à la traction par flexion. Pour chaque longueur de fibre, le phénomène est clairement mis en évidence tout en comparant les différentes courbes au

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

béton témoin (sans fibres). Il apparaît que les fibres apportent une ductilité aux matériaux, la rupture devient ductile au lieu de fragile. L'effort maximal à la première fissuration ainsi que l'énergie de rupture augmentent en fonction du pourcentage en fibres [19].

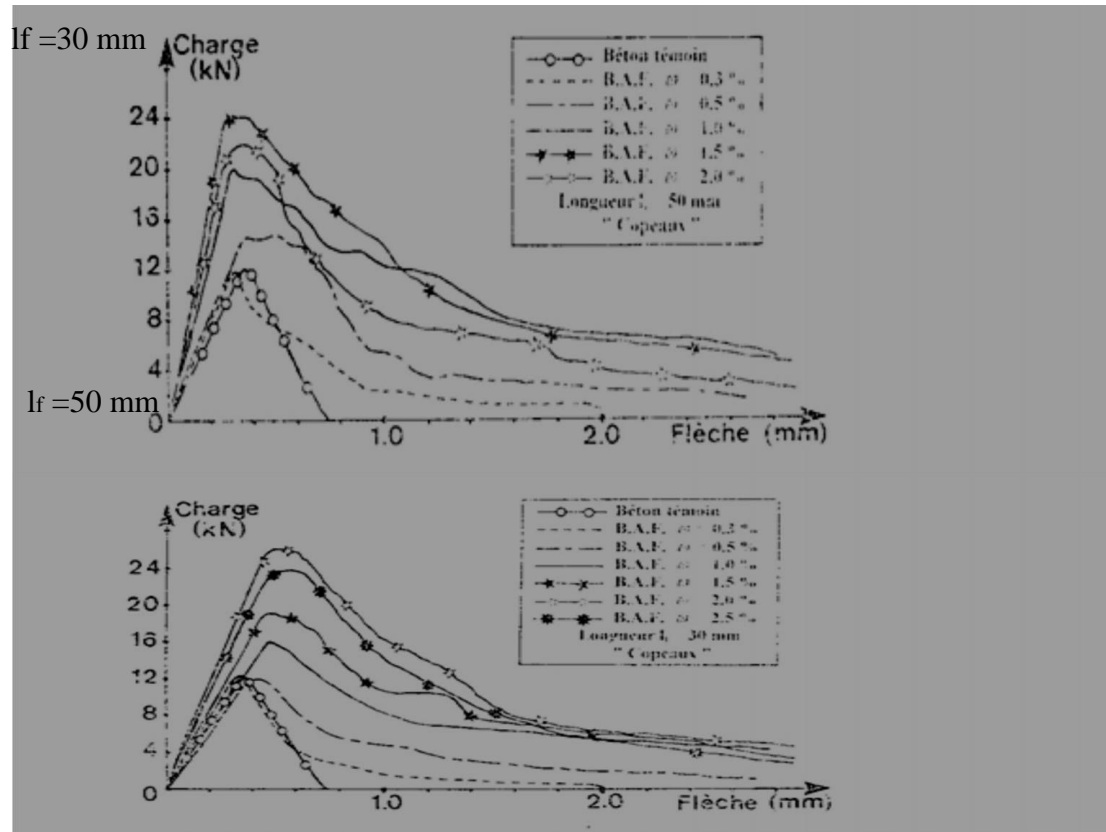


Figure 1.20 : Influence de la longueur des fibres sur la résistance à la traction par flexion [19].

I. CHAPITRE 01 : Etude BIBLIOGRAPHIQUE

1.6 Conclusion du chapitre :

L'étude bibliographique nous a permis de distinguer plusieurs types de fibres ainsi que leurs utilisations, propriétés et leurs comportement. Et pour cela, on va entamer des expériences pour savoir lesquels sont plus performants du point de vue compression et traction par flexion.

Dans ce qui suit de notre travail, l'étude expérimentale va porter sur type de fibre métallique qui sont fibre d'acier ondulée.

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

II.1. Introduction

Après avoir établi au chapitre précédent, une synthèse bibliographique des études et travaux de recherches réalisées sur le comportement physico-chimique et mécanique des bétons renforcés de fibres. On présente dans ce deuxième chapitre, qui est scindé en deux parties :

La première partie est consacrée à l'identification physico-chimique et mécanique des matériaux entrant dans la formulation des bétons d'étude.

La deuxième partie décrit la méthode de formulation des bétons d'étude ainsi que la procédure expérimentale et les résultats des propriétés du béton à l'état frais.

II.1 Identification des matériaux

II.1.1Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé de type CPJ-CEM II/A 42.5 conformes à la norme Algérienne [NA 442 2005], produit par la cimenterie de Hdjar-Soud. Il est constitué principalement de 80% de Clinker, 5% de gypse et 15% de laitier granulé.

Il développe des faibles déformations de retrait et possède une finesse assez importante assurant une bonne compacité et répond convenablement aux critères de résistance mécanique.

Les différentes caractéristiques chimiques, minéralogiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de la cimenterie et vérifiées au laboratoire du département de génie civil. Le même type de ciment a été utilisé pour toute la campagne expérimentale.

Les constituants du ciment, la composition minéralogique du ciment, la composition chimique du ciment du laitier granulé sont respectivement présentées dans les tableaux II.1, II.2 ; II.3. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont données aux tableaux et II.5II.4

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Tableau II.1 constituants du ciment.

Constituant	Valeur (%)
Clinker	≥ 80
Gypse	≤ 5
Laitier granulé	15

Tableau II. 2 : Composition minéralogique du Ciment

Minéral	Valeur (%)
C ₂ S	10 – 25
C ₃ S	55 – 65
C ₃ A	08 – 12
C ₄ AF	09 – 13

Tableau II.3 Composition chimique du Ciment et du laitier

Elément	Taux (%)	
	Ciment	Laitier
SiO ₂	22 – 28	35.85
Al ₂ O ₃	5 – 6	5.08
Fe ₂ O ₃	3 – 3,6	7.77
CaO	55 – 65	37.22
MgO	1 – 2	3.55
SO ₃	1,8 – 2,5	2.02
K ₂ O	0,3 – 0,6	0.27
Na ₂ O	0,1 – 0,16	0.12
CaOL	0,8 – 1,8	0.17
Cl ⁻	0 – 0,01	0.09

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Tableau II. 4 : Caractéristiques physiques

Caractéristique	NORME NA	Valeur	unité
Consistance normale	NA230	≥ 25	%
Début de prise	NA230	≥ 60	mn
Fin de prise	NA230	150 - 250	mn
Expansion à chaud	NA232	≤ 10	mm
Masse volumique absolue (spécifique)	-	3,045	g/cm ³
Masse volumique apparente	-	0,997	g/cm ³
Surface Spécifique Blaine (SSB)	NA231	3995 - 4000	cm ² /g
Retrait sur mortier	NA440	≤ 1000	$\mu\text{m}/\text{m}$

Tableau 5 : Caractéristique mécaniques de ciment

Age	Résistance (MPa)	
	Compression Norme (NA42)	Flexion Norme (N234)
2 jours	$\geq 12,5$	3,0 – 4,0
7 jours	25 – 35	5,0 – 6,5
28 jours	42,5 – 52,5	6,5 – 8,5

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

II.2.2 L'EAU

L'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité (distribuée par les services publics).

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques).

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton.

L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais.

II.2.3 LES GRANULATS

II.2.3.1 LE SABLE

Les deux sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes :

Le premier est un sable moyen roulé, siliceux de dune de la sablière (COUDIET EL OULED ALI) de Tébessa de module de finesse de **2,38** ce qui correspond à un sable (0/5).

Le deuxième est un sable concassé, de roches calcaires, plus grossier que le sable de dune, son module de finesse est de **2.38**.

La composition granulométrique et les caractéristiques physiques sont représentées aux tableaux II.6, II.7, II.8, II.9 et II.10etc.

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Tableaux II.6 :l'analyse granulométrique de sable de carrière

sable de carrière					
Φ de tamis	Refus Mi(g)	Refus Ai(%)	Refus cumulé Ai(%)		Ti(%)
5	5,6	0,56377731	0,56377731		99,43622269
4	38,8	3,90617135	4,46994866		95,53005134
3,15	129,6	13,0474177	17,5173664		82,48263365
2,5	90,5	9,11104399	26,6284103		73,37158965
2	306,6	30,8668076	57,495218		42,50478204
1,6	113,6	11,4366254	68,9318434		31,06815665
1,25	90	9,06070674	77,9925501		22,00744991
1	98,75	9,94160878	87,9341589		12,06584114
0,63		0	87,9341589		12,06584114
0,315	10	1,00674519	88,9409041		11,05909594
0,16	26	2,6175375	91,5584416		8,441558442
0,125	55	5,53709856	97,0955401		2,904459881
0,08	25	2,51686298	99,6124031		0,387596899
fond	8,7	0,87586832	100,488271		-
	998,15				0,488271419
Mf	3,736182422				

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Tableaux II.7 :l'analyse granulométrique de sable de dune

sable de dune				
Φ de tamis	Refus Mi(g)	Refus Ai(%)	Refus cumulé Ai(%)	Ti(%)
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3,15	0,8	0,08053962	0,08053962	99,9194604
2,5	3,5	0,35236082	0,43290043	99,5670996
2	59,2	5,95993154	6,39283197	93,607168
1,6	123,2	12,4031008	18,7959327	81,2040673
1,25	100	10,0674519	28,8633847	71,1366153
1	110,2	11,094332	39,9577167	60,0422833
0,63	220	22,1483942	62,1061109	37,8938891
0,315	195,4	19,6718011	81,777912	18,222088
0,16	35	3,52360817	85,3015202	14,6984798
0,125	65	6,54384375	91,8453639	8,15463606
0,08	48	4,83237693	96,6777409	3,32225914
fond	36	3,62428269	100,302024	-
	996,3			0,30202356
Mf	2,58481828			

II.2.3.2 LE GRAVIER

Le gravillon ou gravier utilisés dans cette étude sont des granulats concassés ,provenant de la même compagnie locale. La nature minéralogique de ces granulats est semblable à celle du sable concassé et présentant une granulométrie continue. Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés aux tableaux...II 8 II ..9.....

Tableau II.8.... Composition granulométrique du gravillon 5/10

gravier 5/10				
Φ de tamis	Refus Mi(g)	Refus Ai(%)	Refus cumulé Ai(%)	Ti(%)
10	312,4	15,65	15,65	84,35
8	355	17,81	33,46	66,54
5	1110,1	55,61	89,07	10,93
fond	218,3	10,93	100	0
	1995,8			

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Tableau II.9.... Composition granulométrique du gravillon 5/10

gravie10/20					
Φ de tamis	Refus Mi(g)	Refus Ai(%)	Refus cumulé Ai(%)		Ti(%)
20	1322	33,09	33,09		67,91
16	1090	27,28	60,37		40,63
12,5	989	25	85,37		14,63
10	486	12,21	97,58		3,42
fond	68	2,68	100		0
	3955				

II.2.3.3 Propriétés physiques des granulats

L'ensemble des propriétés physiques des granulats sont représentés au tableaux
Tableau...II.10.....

Tableau II.10: Caractéristiques physiques des granulats

Caractéristiques	unité	Sable de dune	Sable grossier	Gravier 5/10	Gravier 10/20
Le module de finesse	-	2,58	3,76	-	-
La masse volumique apparente	g/cm ³	1,47	1,40	1,26	1,34
La masse volumique absolue	g/cm ³	2,50	2,60	2,60	2,60
Porosité	%	46,09	46,30	-	
Propreté	%	-	-	0,18	0,18
Coefficient d'absorption	%	-	3,2	2,43	1,31
Module de finesse	su	2,38	3,28	-	-
Equivalent de sable visuel	%	85,66	76,00	-	-
Equivalent de sable piston	%	80,00	70,00	-	-
Los Angeles	%	-	-	21,2	21,2
Micro Deval	%	-	-	16	16
Coefficient d'aplatissement	su	-	-	8,56	10,08

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

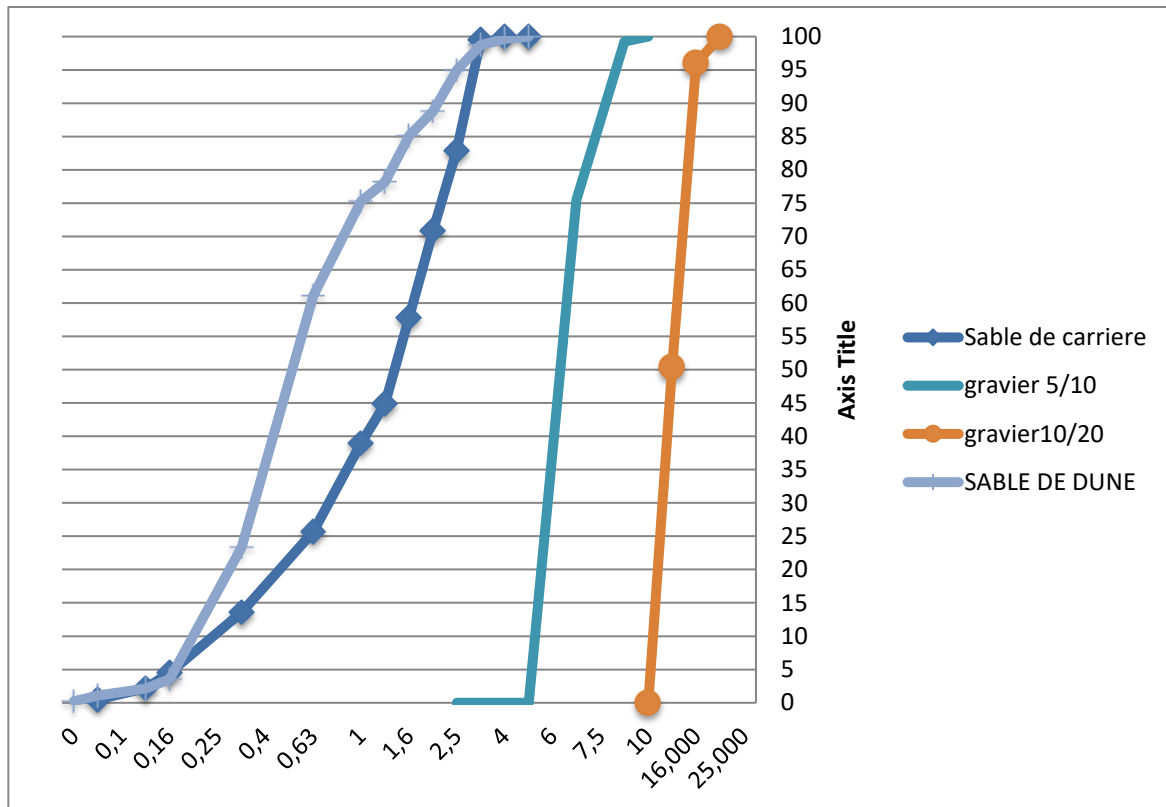


FIG II .11 COURBE Granulométrique de sable et gravier

Tableau II-12 propriétés des bétons d'études l'état frais

Dénomination du béton	Affaissement au cône d'Abrams en cm	Masse volumique en kg/m ³
Béton témoin	8 cm	2340
Béton fibré	4 cm	2660

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

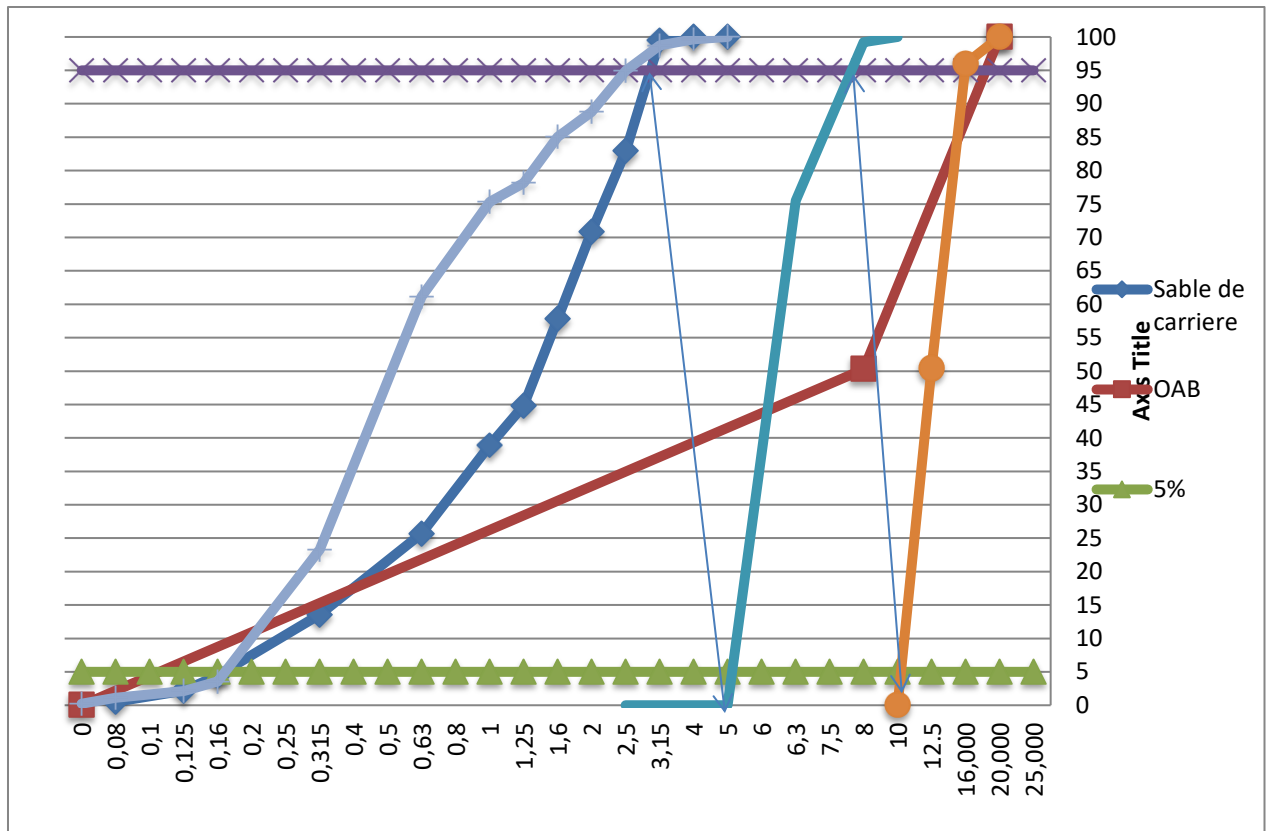


FIG II .13 COURBE Granulométrique de quatre fractions

II 2.3.4 Essai affaissement AU CONE D'ABRAMS

Le cône d'Abrams est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton. Le cône est ensuite soulevé verticalement



Fig. II 14 Mesure de la consistance Affaissement au cône d'ABRAMS

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

II.2.3.5 Fibres

Les fibres métalliques utilisées sont des fibres en acier ondulée commercialisée par la société Algérienne « Granitex» sous la dénomination 'MEDAFAC' (Figure II.15.)

La forme et les dimensions des fibres choisies ont un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons. Les caractéristiques techniques de cette fibre sont données dans le Tableau II.16

Tableau II.15. Caractéristiques des fibres métalliques.

Longueur (mm)	Elancement L/D	Section transversale (mm ²)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
55	69	0.8	7.8	2000	140



Figures II.16. Fibres métalliques ondulées utilisées

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

II.2.3.6 LA FORMULATION DES BETONS DE REFERENCE ET D'ETUDE PAR LA METHODE DE DREUX GORISSE

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose et dont les qualités sont recherchées soit à l'état frais par sa facilité de mise en œuvre soit à l'état durci par sa résistance à 28 jours.

Plusieurs méthodes sont proposées parmi lesquelles la méthode pratique simplifiée dite méthode de "**Dreux Gorisse**". Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités.

Dans cette approche empirique [**Dreux, Festa, 1995**], les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB présentée par deux segments de droite dans le diagramme granulométrique. Cette courbe représente la distribution optimale, sans le ciment (liant), qui conduit à la plus forte compacité granulaire. La formule s'appuie sur quatre relations principales.

- Une relation (équation (II-2)) entre la résistance en compression du béton et le rapport eau/ciment dans la matrice cimentaire en fonction de la classe des ciments et la nature des agrégats. Cette relation s'appuie sur des modes prédictifs de la résistance en compression comme ceux de Bolomey ou de Féret. Elle permet de relier les résistances requises pour le béton à un paramètre clef de la formulation du béton qui est le rapport eau/ciment. A partir de ce rapport et d'un dosage minimal en ciment fixe pour l'ouvrage ou de la consistance désirée.
- Une relation entre le rapport eau/ciment et le dosage en ciment, d'une part et sa consistance, d'autre part. Elle permet de choisir le dosage en eau et la consistance, soit le dosage en ciment et en eau. A partir du dosage en ciment (voir abaque Annexe II-1).
- Une relation (équation II-3) entre la consistance du béton frais et la compacité ou la masse volumique apparente du mélange frais après la mise en place en fonction des moyens de serrage et la dimension maximale des granulats. Elle permet de déterminer le volume total des granulats (voir tableau Annexe II-2).
- Une relation (équation II-4) qui permet de définir le rapport entre les classes granulaires grossières et les classes granulaires fines conduisant à l'optimisation du squelette granulaire du mélange et à l'obtention de la compacité maximale. Elle Permet de déterminer le volume relatif des différentes classes granulaires à mettre en œuvre dans le mélange.

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

II.2.3.7 LES DONNEES

- f_{c28} : Résistance en compression à 28 jours.
- La plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abraham (AC) pour avoir un béton peu plastique.
- D : Dimension maximale des granulats en mm.

II.2.3.8 MODE OPERATOIRE

La résistance serait:

$$f_{c28} = f_c + 15\% f_c \dots \dots \dots (II-1)$$

1- Dosage en ciment et en eau :

A partir de la formule ci-dessous on détermine le rapport C/E

$$f_{cj28} = G \cdot f_{c28} \cdot (C/E - 0,5) \dots \dots \dots (II-2)$$

Avec :

- f_{c28} : résistance en compression désirée à 28 j en bars.
- f_{cj} : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en bars.
- C : Dosage en ciment (en kg/m³).
- G : Coefficient granulaire : valeur tabulée en fonction de la qualité des granulats.
- (Bonne ou courant, excellente, passable) et de la dimension D des gros granulats les valeurs approximatives de G supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).
- E : Dosage en eau sur matériaux secs (en litres pour 1 m³ de béton).

Le dosage en ciment est tiré de l'abaque en fonction de C/E et A. (voir abaque Annexe III-1).

Ayant fait le choix du dosage en ciment C, on calcule alors le dosage approximatif de l'eau (E).

2- Dosage en granulat :

Les proportions des constituants granulaires du mélange sont déduites d'une courbe de référence OAB.

Le point O (origine) a pour coordonnées [$X_0=0,08$ mm, $Y_0=0$ % passant].

Le point B (extrémité) a pour coordonnées [$X_B=D_{max}$, $Y_B=100$ % passant] (avec D_{max} la taille du plus gros granulat).

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Le point A (brisure de la courbe) a pour coordonnées [XA=Dmax/2 et YA = 50 - D + K+ Ks + Kp]. Les valeurs de K, Ks et Kp sont donnés à partir de tableaux (voir Tableau annexe II-2) ou d'abaques associées à la méthode.

Les proportions volumiques des différents granulats dans le mélange sont alors tirées du graphique (Fig. II-3) selon les lignes de partage. La projection sur l'axe des tamis des points d'intersection entre les lignes reliant le point 95 % des passants d'un granulat au point 5 % des passants du granulat suivant et la courbe granulaire de référence permet de lire les quantités (gi) en pourcentage de chaque fraction de granulaire (sable et gravier).

Le volume total absolu des granulats. $V = 1000 \cdot \gamma - V \dots\dots\dots$ (II-3).

Avec :

- γ : coefficient de compacité qui est fonction de D max, de la consistance et du moyen du serrage (voir Tableau annexe III-3).

Les volumes absolus de chaque granulat sont donnés par l'expression suivante :

$$V_i = g_i \cdot V \dots\dots\dots (II-4).$$

Avec :

- V_i : Volume du granulat en (Kg / m³ de béton).
- g_i : Pourcentage du granulat tiré du graphique (%).
- V : Volume total des granulats (m³).

II.2.3.9 CALCULS DE LA COMPOSITION DES BETONS :

Composition N°1

A- Béton de référence (BO) :

Détermination des dosages des constituants du béton de référence

BETON	F_c à 28j du béton (R_n)	30MPa	
	béton plastique Aff	8 cm	
	vibration normal		
CIMENT	R _c à 28j du ciment	42,5 MPa	
	F _c vrai du ciment	39MPa	
	MV ciment	3.1 g/cm³	

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

- La résistance nominale $f_c = 30 \text{ Mpa}$;
- Le dosage en ciment : 375 kg/m^3 ;
- La résistance moyenne à 28 j $f_{cj} 28 = 34.5 \text{ Mpa}$;
- Le dosage en eau : $E = 201,5 \text{ Kg / m}^3$ pour assurer l'affaissement
- Rapport $C / E = 1.81$;
- Tracé de la courbe de référence OAB : $X = (10) Y = 50.28 \%$ (figure III-2) ;
- 40% des granulats sable, 60% de gravier 18% SABLE carrière et 22 % sable de dune gravier 5/10 20 % gravier 10/20 40%.
- Les dosages des granulats sont calculés selon les proportions données par le graphe (figure III-1).
- Composition du béton de référence est:
- La composition du béton de donnée au tableau II- 17

Tableau II- 17: Composition du béton d'étude (Dosage, Kg/m³)

Constituants béton	Ciment	Eau	Sable de dune	Sable de carrière	Gravier 5/10	Gravier 10/20	fibre
Béton témoin	375	201.5	370.04	298	398.14	760.08	
Béton fibré	375	201.5	370.04	298	368.41	747.08	78

II.2.4.1. Méthode de formulation des bétons fibrés

L'optimisation de la composition des bétons fibrés est un passage nécessaire dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été optimisé sans fibre [Rossi 1991]. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice et altère sa compacité. Il est évident que cette perturbation est plus importante lorsque le pourcentage de fibre est élevé.

Les méthodes de composition des bétons renforcés par des fibres métalliques élaboraient par plusieurs chercheurs [Rossi 1989], [Bernier 1991] et [Zhan 1991], sont basées essentiellement sur un grand nombre d'études expérimentales. Elles aboutissent à des recommandations qui ne sont pas adaptées à toutes les utilisations que l'on fait du béton de fibres et ne permettent pas de tirer le meilleur parti de ce composite. Selon l'application industrielle envisagée, la composition du béton renforcé de fibres métalliques doit être à

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé [Djebali 2013].

Ainsi, suivant que l'on désire, obtenir un béton de fibres métalliques très maniable, très résistant ou ayant une influence sur la ductilité des structures, la composition du matériau composite sera complètement différente.

Pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) propose une méthode expérimentale basée sur la méthode de Baron Lesage [Baron 1976]. Cette méthode est basée sur deux hypothèses [Rossi 1991]:

- Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C fixé), le béton le plus maniable est le plus compact et son squelette minéral est optimal.
- Le dosage optimal en granulats ne dépend pas de la nature et du volume de pâte de ciment (Eau + ciment).

Pour appliquer cette méthode au béton de fibres métalliques on introduit une troisième hypothèse :

- L'ajout de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses [Rossi 1991].

On doit d'établir au préalable :

- Le rapport eau / liant.
- Le diamètre du plus gros granulats.
- La géométrie et les dimensions de la fibre.
- Le pourcentage des fibres.
- La maniabilité souhaitée.
- La variation du rapport massique S/S+G avec la maniabilité correspondante : si la maniabilité voulue n'est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un super plastifiant.

L'application de la méthode de Baron-Lesage pour la composition du béton de fibres métalliques conduit à une composition totalement différente de celle du béton courant.

La composition obtenue est riche en pâte de ciment, ce qui favorise l'adhérence des fibres à la matrice. Lors de l'élaboration du béton de fibres métalliques il convient :

- De bien choisir la méthode de mesure de l'ouvrabilité du béton car toutes les méthodes ne conviennent pas au béton de fibres.
- De choisir judicieusement le type et le pourcentage de fibres à incorporer en relation avec l'application industrielle visée.

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

- D'éviter l'utilisation de l'aiguille vibrante du fait de l'orientation préférentielle des fibres et de l'effet de cheminée. Il est préférable d'utiliser les vibreurs de coffrage et les règles vibrantes.

- De porter une grande attention à la méthode de malaxage, donc à la séquence d'introduction des différents matériaux, de façon à assurer une distribution uniforme des fibres dans le mélange frais.

II.2.4.2. Mise en œuvre des bétons fibrés

Lors de la mise en œuvre du béton de fibres, le dosage en fibres ne peut pas dépasser certaines limites car au-delà, le gâchage et la mise en œuvre deviennent impossibles. Compte tenu des rôles opposés dévolus aux paramètres fondamentaux des fibres (dosage en volume, forme et rapport longueur sur le diamètre) sur l'ouvrabilité et la mise en œuvre, et sur l'efficacité mécanique après durcissement, on doit se limiter à une gamme de pourcentages qui ne donne qu'une efficacité mécanique mais qui permet une mise en œuvre acceptable [Absi 1994]. Les méthodes actuelles de formulation, permettent d'obtenir des bétons de fibres à la maniabilité souhaitée, même lorsque le pourcentage de fibres incorporé est important.

Lorsqu'on met en œuvre un béton fibré, il faut connaître et de tenir compte certaines spécificités de ce béton, liées à la technologie, de la mise en œuvre adoptée.

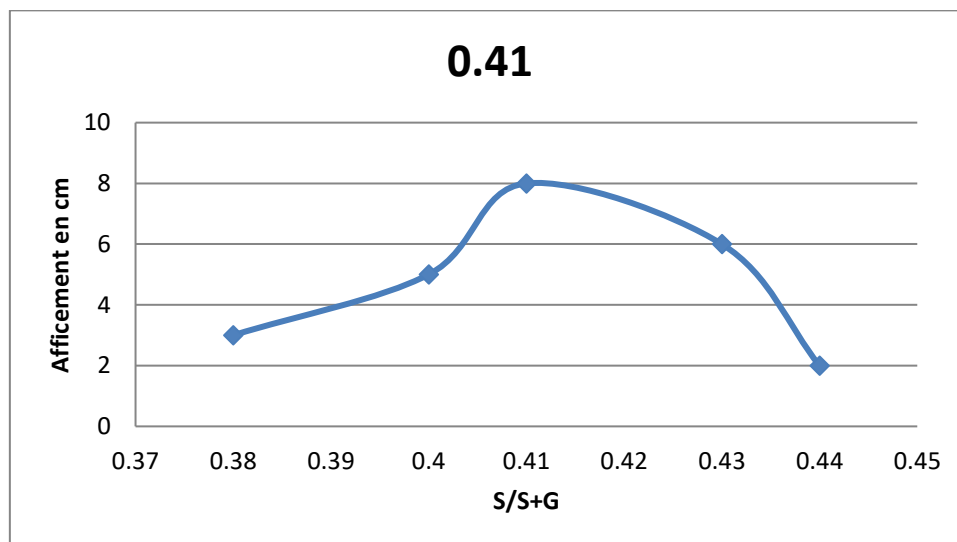


fig. II .18 recherche de la compacité optimale

Le type de compactage (C'est-à-dire table vibrante, compactage manuel et vibration interne) est considéré comme ayant une influence considérable sur la distribution des fibres. Sur des bétons conventionnels ayant une densité de fibres de 40 kg/m³ a montré que pour les coffrages prismatiques, la table vibrante constitue le dispositif de vibration le plus performant pour obtenir la disposition préférentiel horizontal des fibres.

II. Chapitre 02: Matériaux et formation des bétons d'études

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes caractéristiques des matériaux utilisés, les méthodes de formulation choisies et les résultats de minérales et du taux de fibres sur les propriétés du béton à l'état frais. A l'issue de cette première étude les constatations suivantes peuvent être dégagées: les résultats acquis à partir des analyses consacrées essentiellement à l'identification et à la caractérisation des composants des BFM utilisés dans notre étude, montrent que les matériaux utilisés répondent aux exigences normatives, malgré quelques anomalies qu'il faut prendre en considérations lors de la formulation des bétons d'étude. Avec la recherche de performances, la formulation joue un rôle de plus en plus important sur la qualité du béton fibré, tant sur l'obtention du niveau de performance que sur leurs régularités pendant la construction des ouvrages, la méthode choisi est une combinaison de trois approches avec ajustement et optimisation expérimentale du rapport S/G+S. Les ajustements proposés permettent de tenir, de la forme, de l'élancement des fibres et du dosage du couple granulats-fibres. L'ajout des fibres métalliques confère au béton à l'état frais une cohésion, mais affecte la maniabilité (diminution de l'affaissement au cône augmentation du taux de fibres). Ce qu'il faut prendre en considération lors de la formulation des B fibré. Nous n'avons pas pu doser aussi les BF avec des teneurs en fibres su à 1%. Au-delà de ce dosage nous avons constaté la formation de pelotes ou d'oursins. L'élancement de la fibre (l/d) est un paramètre de grande importance par son influence sur la maniabilité des bétons.

Le chapitre suivant va consister à une caractérisation approfondie de l'influence des différents paramètres de formulation sur du comportement mécanique des bétons d'étude.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

III.1. Introduction

Dans le but de réduire la fragilité du béton et d'augmenter la résistance après la fissuration des bétons témoin, les recherches sont orientées vers le renforcement des bétons par fibres métalliques réparties de manière aléatoire dans la matrice. Le composite obtenu est appelé béton fibré ou béton renforcé de fibres métalliques.

Les performances du béton renforcé de fibres métalliques dépendent de nombreux facteurs, tels que la géométrie de la fibre, le dosage en fibres et les propriétés de la matrice surtout au niveau de la zone l'interface fibre-matrice. Les tests mécaniques restent toujours primordiaux pour toute étude de l'influence de la nature et le taux de fibres sur le comportement mécanique des matériaux cimentaires.

Dans le cadre de cette étude, un programme expérimental complet a été choisi pour bien caractériser le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres métalliques. Ce programme concerne les propriétés suivantes:

- Résistance à la compression.
- le comportement mécanique des poutres en flexion et qui la résistance en traction par flexion charge-déplacement et charge-ouverture de fissures.

III.2. résistance en compression

III.2.1. Essai de compression

La résistance mécanique en compression est un repère principal de la résistance mécanique qui caractérise la qualité du matériau «béton». Ce paragraphe présente une description détaillée de la procédure de détermination de la résistance mécanique en compression.

Les éprouvettes utilisées sont de forme cubique de dimensions (100x100x100) mm (voir figure III.2) confectionnées conformément à la norme NF EN 12390-3 [NF EN 12390-3 2012]. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont conservées en humidité saturante jusqu'aux échéances des essais qui sont 14 et 28 jours. Pour chaque béton et chaque échéance d'essai la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes.

L'écrasement des éprouvettes a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN asservie en force avec une vitesse de chargement de $2,4 \pm 0,2$ kN/Sec, (Figure III.1). La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à "j" jours f_{cj} est le rapport entre la charge de rupture

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

et la section transversale de l'éprouvette : $f_{cj} = P/S$ (MPa) Où P : charge de rupture en N, S : section transversale de l'éprouvette en mm², est évident pour les bétons ordinaires, que le mécanisme de rupture en compression dépend d'abord des événements de rupture en traction interne (voir figure I.11). D'abord, apparaissent des fissures parallèles au chargement et ensuite se forment des fissures obliques.

D'après Rossi [Rossi 1998], l'origine de ces fissures de traction pendant la compression serait due à des contraintes au niveau de la pâte de ciment durcie, causées par différence de raideur entre celle-ci et les granulats. L'utilisation des fibres métalliques en petites proportions, n'affectent pas significativement la résistance à la compression du béton [Rossi 1987]. L'augmentation de la résistance à la compression finale par l'addition de fibres d'acier varie de 0 à 15% pour un dosage volumique de 1,5% de fibres [Comité ACI 544 1997].

[Bascoul 2003], montre que pour des bétons à hautes performances fibrés, des gains de résistance en compression d'environ 25% sont obtenues après l'utilisation de microfibres métalliques de 13 mm de longueur et avec un dosage de 80 kg/m³ par rapport à celle du béton non fibré. L'ajout de fibres d'acier affecte non seulement la résistance à la compression ultime, mais confine le matériau et retardent la propagation de la fissure, ce qui améliore la résistance en compression au pic et au post pic ainsi que la ductilité relative du matériau.



Figure III.1. Essai de compression.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III. 2 Eprouvettes utilisées pour les tests de compression.

III.2.2. Résultats et interprétation du test de compression

Les résultats du test de compression des échantillons de béton renforcé de fibres métalliques en comparaison avec ceux du béton témoin sans fibres sont représentés dans le tableau III 3 et la figure III 4.

Tableau III 3. résultats de résistance en compression

Age du béton en jours	Résistance en compression (MPa)	
	Béton témoin	Béton fibré
14	33.63	39.98
	33.53	37.70
	33.87	36.48
28	38.89	45.82
	36.30	43.22
	39.87	42.53

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

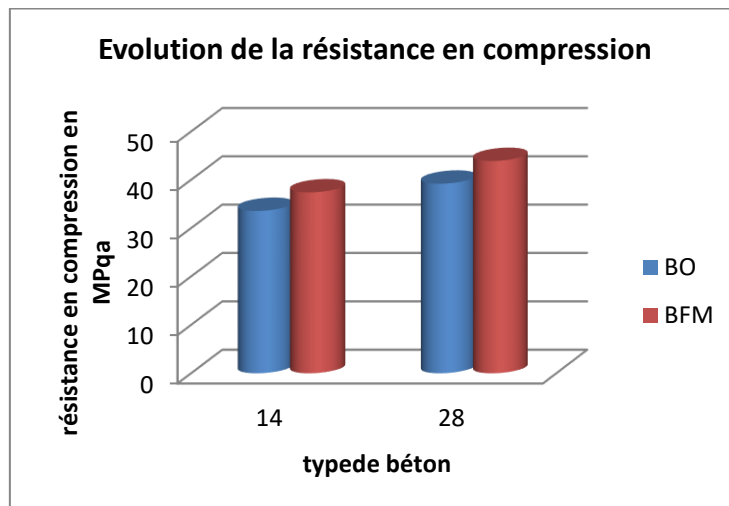


Figure III 4. Résistance en compression moyenne de béton témoin



Béton témoin



Béton Fibré

Figure III 5. Mode de rupture en compression.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

➤ Interprétation

On peut voir selon les résultats obtenus qu'avec l'ajout de fibres dans la formulation une augmentation de la résistance a été obtenue. les gains de résistance à 14 jours et 28 jours sont respectivement de l'ordre de 11.44 et 12 %. Cela peut s'expliquer par la forme ondulée des fibres qui assure une bonne adhérence et s'oppose à la contrainte de traction engendré par la charge de compression. Ce qui confirme les résultats de la figure III. 4 et ceux de la littérature (Comité ACI 544 1997 et Bascoul 2003),

III.3. Comportement mécaniques en flexion des poutres testées

III.3.1 Procédure expérimentale

A/ Poutres et ferrailage utilisé :

L'objectif de ce travail constitue une contribution à l'analyse du comportement des poutres non armé et armé et/ou renforcées de fibres métalliques de forme ondulée.

Pour atteindre cet objectif, une étude expérimentale et une autre analytique ont été effectuées sur des poutres en béton non armé et armé renforcées par fibres Métalliques.

A-1/ Description des Poutres

Les poutres utilisées sont des poutres prismatiques de section rectangulaire de 15x20 cm² et de portée 120 cm. Ces poutres ont été dimensionnées vis-à-vis l'état limite de service selon les règles BAEL 91. Une vérification a été faite à l'état limite ultime.

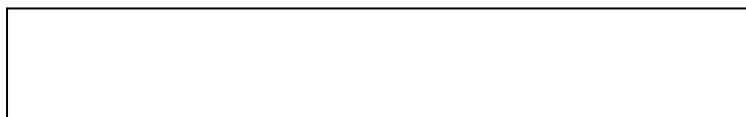
Les aciers utilisés pour le ferrailage sont de classes : des barres à haute adhérence servant comme ferrailage longitudinal pour les poutres des barres (voir la figure III 8.....)

Les poutres ont été fabriquées en utilisant un béton ordinaire de résistance à la compression mesurée à l'âge de 28 jours de 39 MPa.

A-2/ ferrailage des Poutres

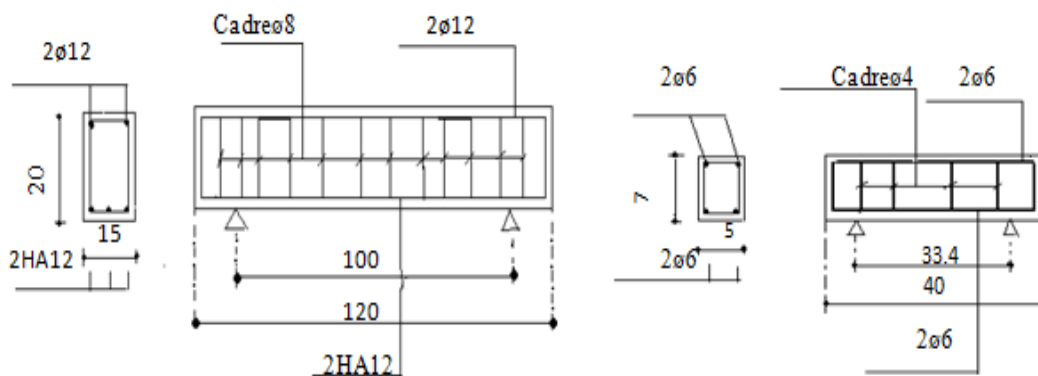
Quatre types de poutres ont été testés en faisant varier le ferrailage et l'incorporation de fibres métalliques :

- ✓ Trois poutres en béton témoin **sans** ferrailage et sans fibres, (PBT)



- ✓ Trois poutres en Béton Armés ferrailé selon la règle BAEL 91 (PBA). Le ferrailage de ces poutres est donné dans la figure.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

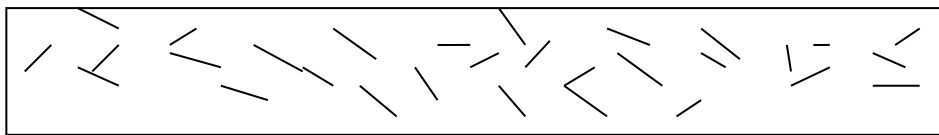


a : Schéma de ferrailage des poutres (échelle1)

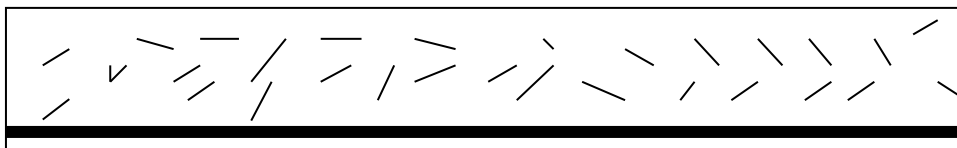
b : Schéma de ferrailage (modèle réduit)

Figure III.6 Schéma de ferrailage des poutres

- ✓ Trois poutres en Béton non armé et renforcées de fibres Métallique de forme ondulée, (PBF)



- ✓ Trois poutres en Béton Armés dans la zone tendue et renforcées par fibres Métallique ondulées (PBAF)



B/ Test de traction par flexion

L'essai de flexion trois points réalisé selon la figure III.8, été effectué sur des éprouvettes prismatiques entaillées. Le module de rupture est donné par l'équation (Eq. III.2) :

$$f_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

f_{tf} : Résistance en traction par flexion en (MPa).

Fl : Charge maximale en (N).

l : Portée en (mm) ; b : Largeur de l'éprouvette en (mm) ; h : hauteur de l'éprouvette en (mm).

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III.7 la machine de traction par flexion trois point

- L'essai de traction par flexion de trois points consiste à placer la poutre dans la machine de traction par flexion de en trois points sur les deux appuis de façon à laisser 10cm à chaque extrémité de poutres.
- Tracer le milieu de la poutre et fixé le comparateur au-dessous de la poutre.
- En applique des charges ascendantes sur la poutres et lire les déplacements sur le comparateur.
- Dès que la fissure apparaitrai en utilise la loupe pour mesurer les fissures par précision jusqu'à la rupture.
- les contraintes sont calculées selon l'équation ($f_t f = 3Pl/2bh^2$) et les résultats sont illustrés ensuite sous forme de courbes.

III. 3.2 Charges (contraintes) – déplacement et Charges (contraintes) – ouverture de fissures :

La flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre. L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou *flèche*, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

Pour effectuer cet essai on va se référer à la norme : **NF B 51-008**

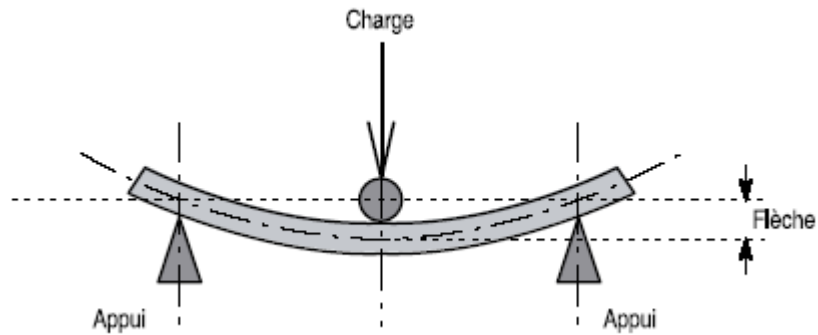


Figure III.8/bis. Détermination du déplacement en flexion

III.3.3 Résultats du comportement mécanique en flexion des poutres d'étude

- 1/ Cas des poutres témoins non armé et non renforcés de fibres .
- 2/ Cas des poutres armé et non renforcés de fibres.
- 3/ Cas des poutres non armé et renforcés de fibres.
- 4/ Cas des poutres armé dans la zone tendue et renforcés de fibres.
- 5/ Etude comparative.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

III.3.3.1 Cas des poutres témoins non armé et sans fibres

La déformation et le mode de fissuration et de rupture des poutres témoins non armé et sans fibres est illustrée par les figures (figure III 9, figure III 10, figure III 12, figure III 13 et figure III 14).



Figure III 9. Essai de flexion de la poutre en béton témoin

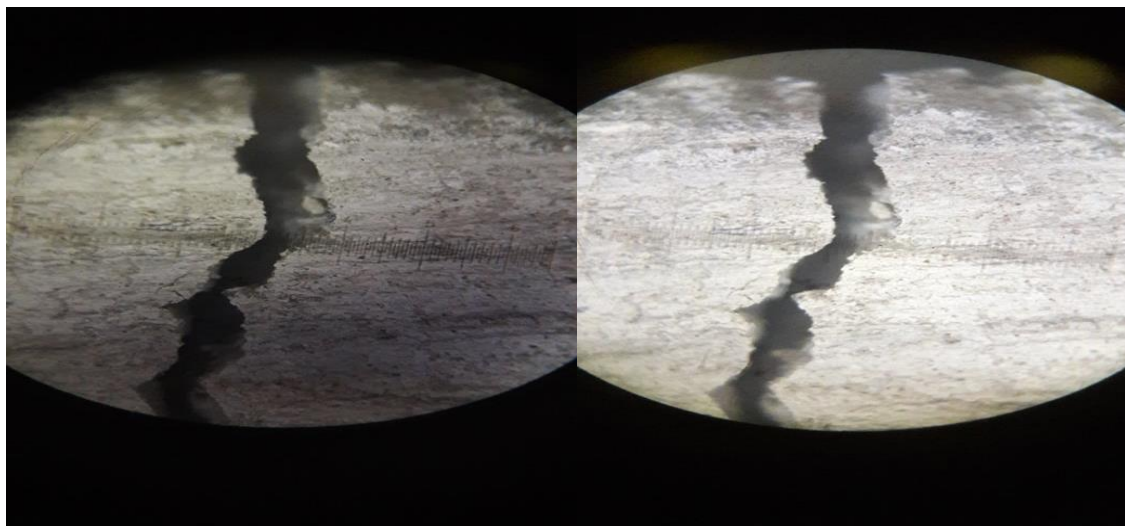


figure III 10. Mode de fissuration et de rupture de La poutre en béton témoin

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III 11. Mode de fissuration de la poutre BT



a/ première fissure

b/ dernière fissure

Figure. III 12. Mesure de la première et dernière fissure sur la poutre

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

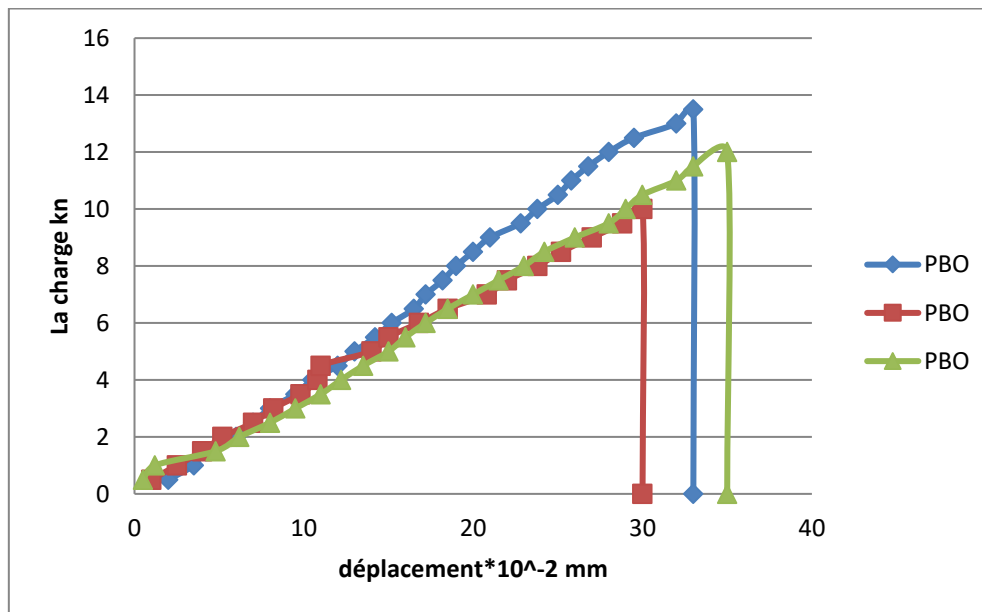


Figure. III 13. Courbe charge- déplacement de la poutre Béton Témoin sans fibres

➤ Interprétation

Courbe-charge-flèche des poutres témoins :

L'évolution de la flèche en fonction de la charge des poutres PBT1, BTP2 et BTP3 est illustrée par la figure 9. On distingue une phase linéaire de pente différente très proche. La première traduit le comportement élastique de la poutre et la seconde traduit l'apparition et le développement de l'endommagement au sein du volume du matériau au fur et à mesure que la charge augmente jusqu'à la rupture. La rupture des poutres de béton témoin a été brutale et se produit au milieu de l'échantillon (sous le point d'application de la charge).

Phase I: comporte trois parties :

- Une première partie quasi linéaire durant laquelle il est couramment admis que la sollicitation n'entraîne que la propagation de micro-défauts préexistant dans le matériau (défauts initiaux et d'hétérogénéité des caractéristiques locales du matériau).
- Une seconde partie non linéaire allant jusqu'au pic de chargement. Elle correspond à la propagation des microfissures dans le béton.
- Une troisième partie voit son origine au pic de charge qui correspond à la coalescence des précédentes microfissures et à leur localisation dans la section la plus sollicitée, c'est à- dire au-dessous du point d'application de la charge.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

Phase II:

La deuxième phase qui correspond au domaine post-fissuration. Ce domaine post pic traduit la capacité de transfert des contraintes à travers la fissure. Pour les faibles ouvertures de fissures, cette capacité peut être assurée par engrenement de part et d'autre de la fissure (la fracture n'est pas plane). Elle dépend alors de la rugosité surfacique qui est principalement fonction de la taille des granulats. Donc elle est caractérisée par une descendante ramifiée jusqu'à la rupture, puis la séparation complète de l'éprouvette en deux parties.

III 3.3.2 Cas des poutres armé et non renforcés de fibres

La déformation, le mode de fissuration et de la rupture des poutres témoin armé et sans fibres est illustrée par les figures du III. 14 au III. 18 et les courbes de déformation sont représentées par les figures III.19, III.20 et III.21



Figure. III 14 Mode de fissuration de La poutre en béton Armé

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III 15 Mode de fissuration de La poutre en béton Armé fissuré



Figure III 16 les fissures sur la poutre en béton armé

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

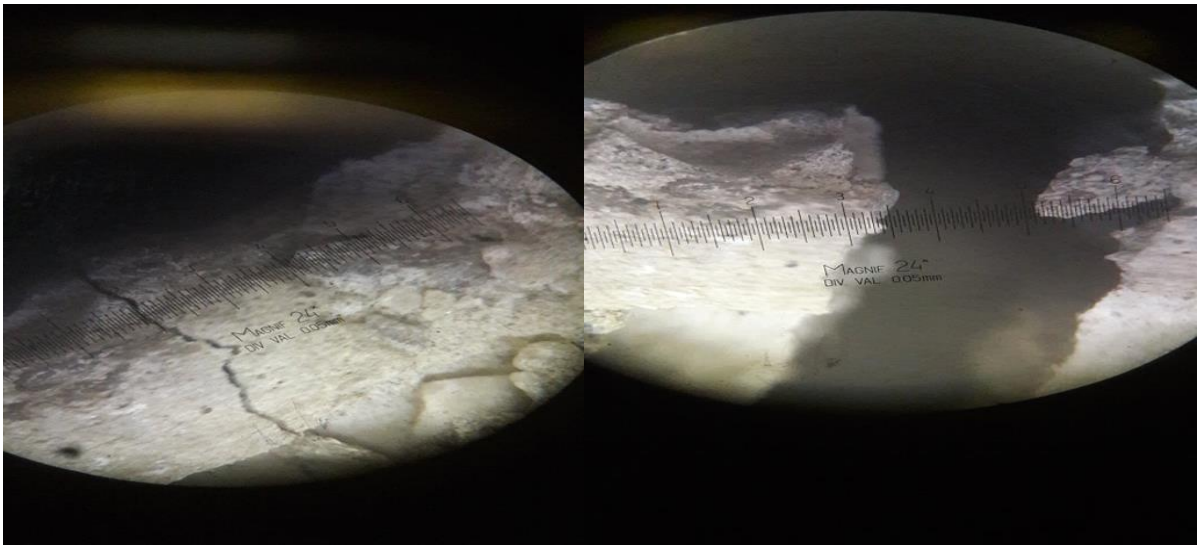


Figure III 17. Première fissure sur la poutre armé Figure III 18 dernière fissure sur la poutre armé

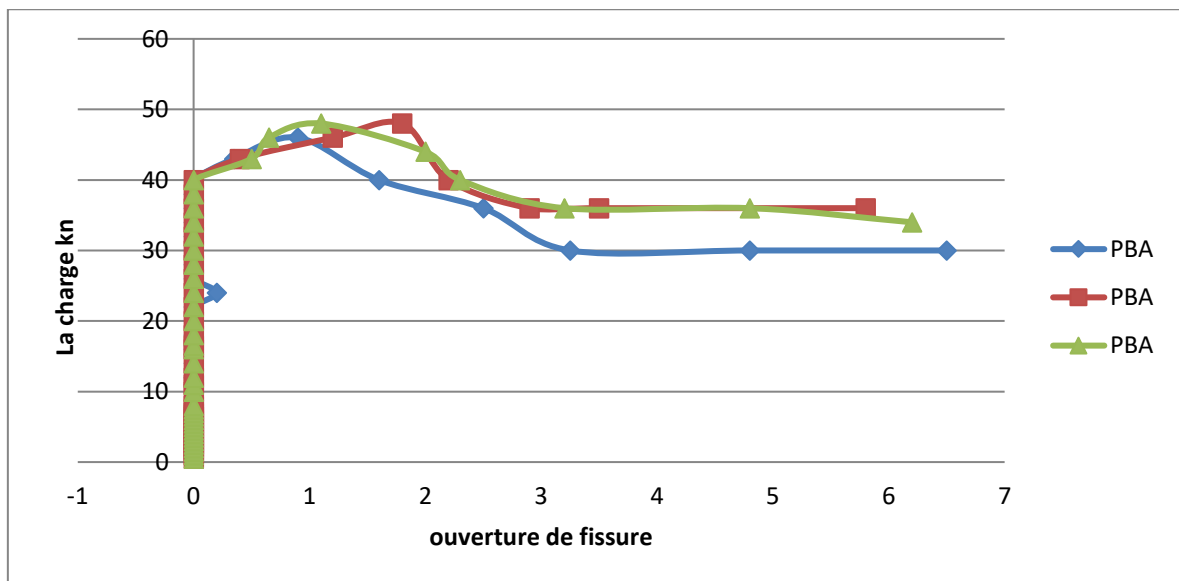


Figure III 19 courbe charge-ouverture de fissures de la poutre Béton Armé

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

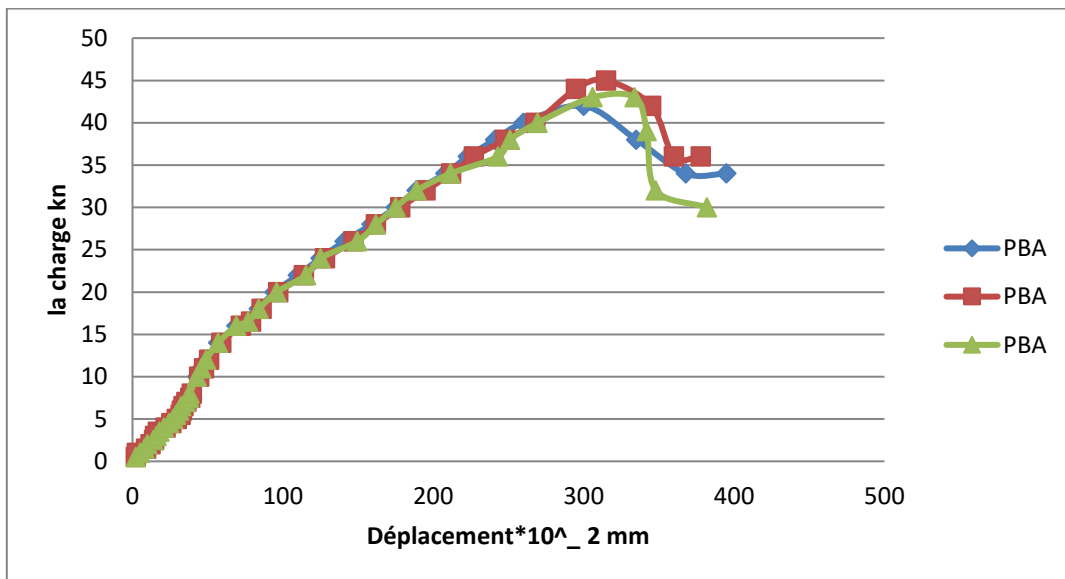


Figure III 20 courbe charge- déplacement de la poutre Béton Armé

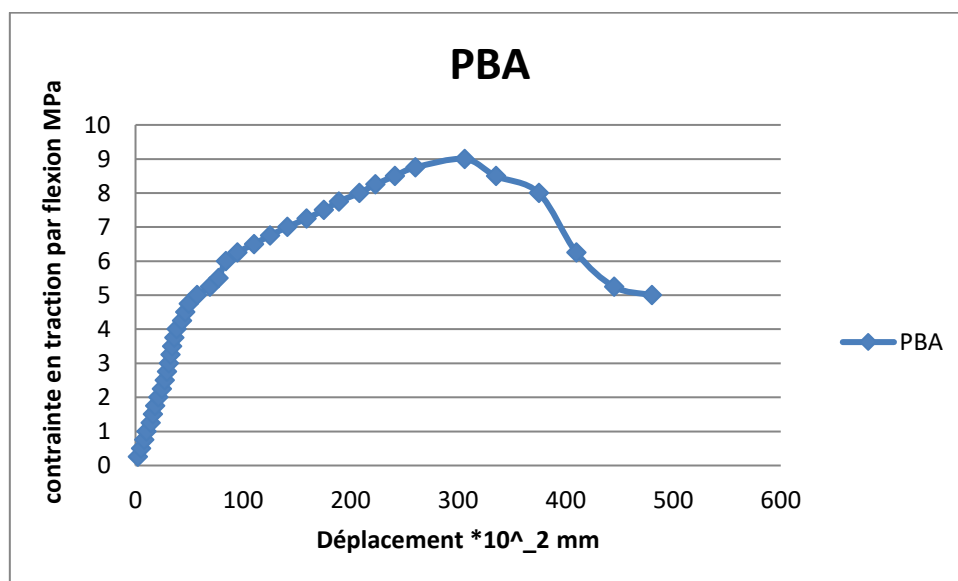


Figure III 21. Courbe contrainte traction par flexion-déplacement de la poutre Béton Armé

➤ Interprétation

Ces courbes ont des allures similaires sur le plan de la forme et peuvent être divisées en trois phases traduisant un comportement ductile des poutres armés :

Une partie quasi linéaire durant laquelle l'apparition des microfissures verticales, une dernière phase non linéaire annonçant la rupture des échantillons l'évolution de la flèche est proportionnelle à celle de la charge qui représente la réponse élastique des poutres, une 2^{ème}

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

phase durant laquelle la courbe s'écarte de la linéarité et qui se traduit par l'approximation est très bonne et l'écart. Ces poutres armées passent par différentes étapes avant la rupture, les observations suivantes peuvent être faites.

Phase de stabilité :

C'est l'étape de la mise en charge de la poutre avant l'apparition des premières fissures au niveau des fibres les plus tendues du béton. Durant cette étape, les poutres restent stables (non fissurées).

Phase de fissuration :

A un niveau de charge précis pour les poutres armées, deux micros fissures verticales apparaissent en symétrie par rapport à l'axe passant par le point d'application de la charge. Les fissures résultantes sont des fissures de flexion.

Phase de développement des fissures :

Sous l'augmentation de la charge extérieure, les deux fissures se développent en longueur et en profondeur. Ces fissures s'inclinent vers le point d'application de la charge à cause de la présence de l'effort tranchant. A l'approche de la ruine, d'autres petites fissures secondaires apparaissent à côté des deux fissures principales, comme le distingue la figure 15.

Phase de rupture :

A un niveau de charge précis, les poutres sont rompues à cause du moment de flexion (fissures verticales) pour la poutre et de l'effort tranchant pour les poutres armées avec la destruction du béton comprimé sous le point d'application de la charge comme montré sur les figures 19 et 29. Il a été noté que la rupture du béton comprimé au niveau du point d'application de la charge est plus remarquable sur les poutres de modèle réduit. Cela peut être expliqué par la combinaison d'une surface de contact très petite entre le vérin et le béton et d'une charge ultime importante à imposer une contrainte de contact extrême sous la charge, ce qui a provoqué l'écrasement du béton. De plus, le moment et l'effort tranchant sont maximaux sous la charge ce qui rend plus sévère l'état de contraintes dans cette section.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

III 3.3.3 Cas Les poutres fibré sans ferrailages

La déformation, le mode de fissuration et de la rupture des poutres témoin armé et sans fibres est illustrée par les figures du III.22 au III.27 et les courbes de déformation sont représentées par les figures III.28, III.29, III.30 .



Figure. III 22. Essai de Flexion sur la poutre en béton fibré



Figure III 23 Mode de fissuration de la poutre en béton fibré (apparitions de la fissure)

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III 24 Mode de fissuration de la poutre en béton fibré (développement de la fissure)

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure. III 25 mode de rupture sur la poutre en béton fibré (phase de rupture)

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

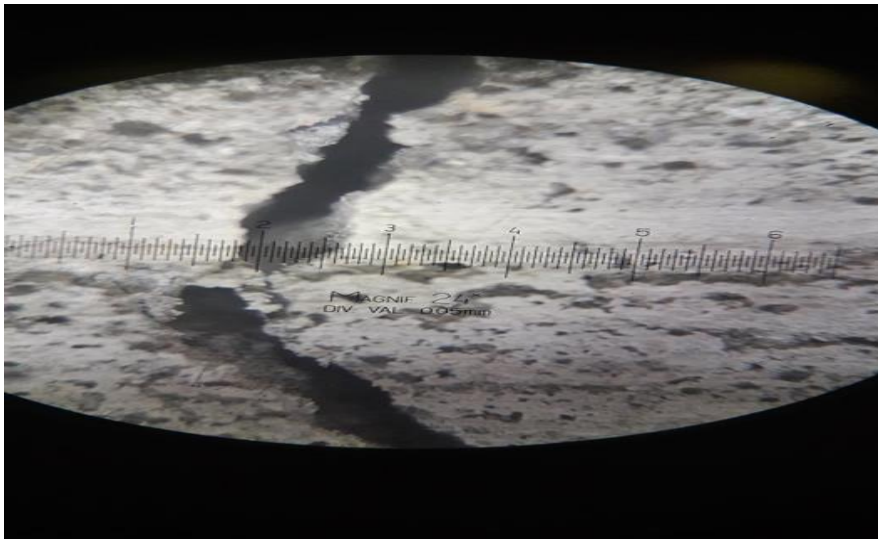


Figure III 26. Mesure de la première fissure sur la poutre en béton fibré

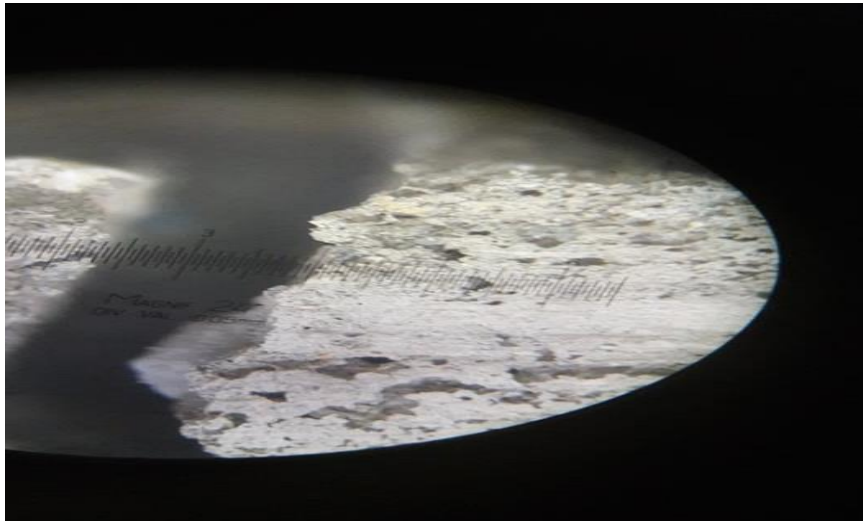


Figure III 27. Mesure de la dernière fissure sur la poutre en béton fibré

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

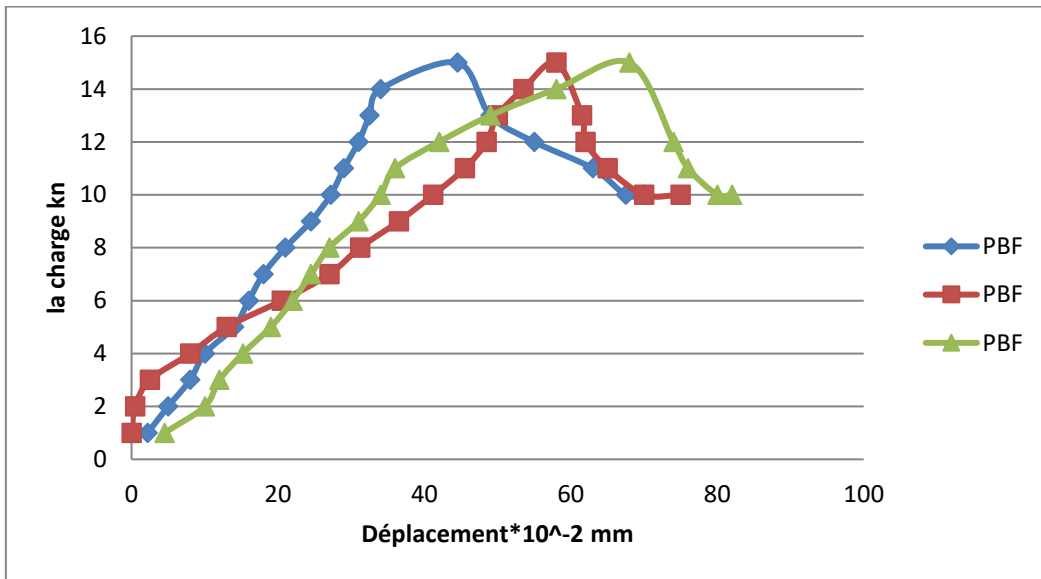


Figure III 28 courbe charge- déplacement de la poutre béton fibré

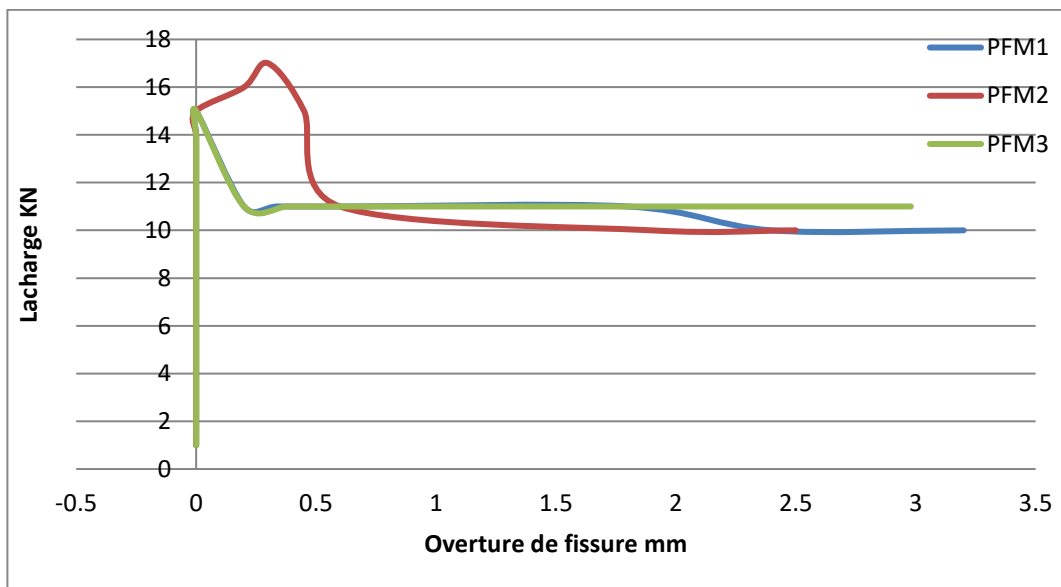


Figure III 29 courbe charge-ouverture de fissure de la poutre béton fibré

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

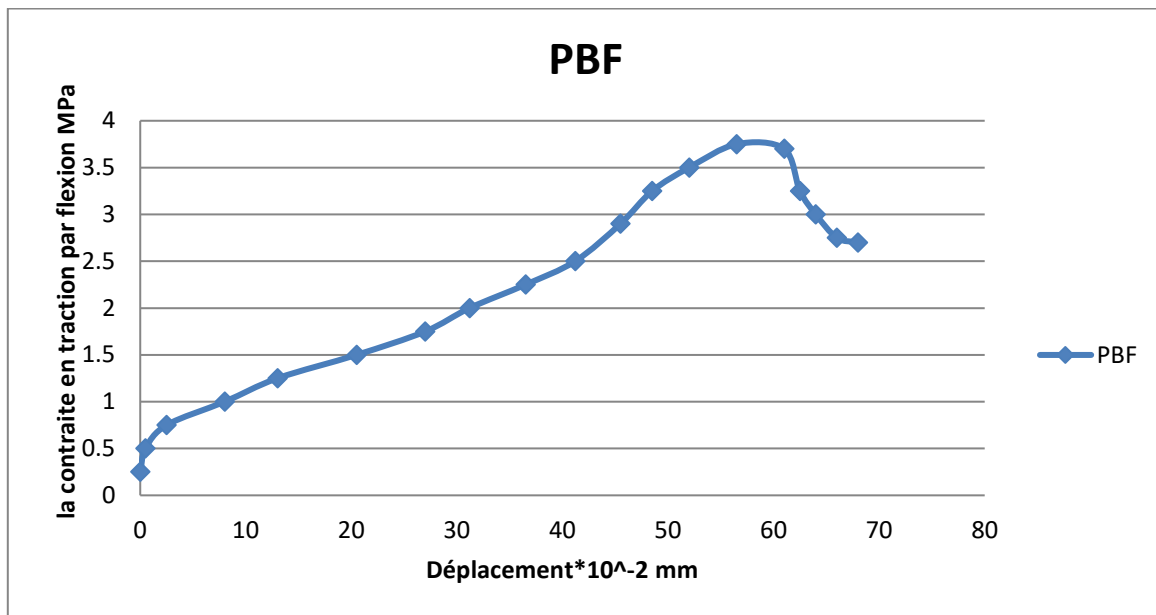


Figure III 30 courbe contrainte en traction par flexion- déplacement de la poutre béton fibré

➤ Interprétation

On considère un prisme soumis à un chargement en flexion. La figure 3.2 schématise de diagrammes effort-flèche correspondant à de bétons de fibre leur comportement post fissuration. Sur ces diagrammes, on peut distinguer quatre zones correspondant à l'évolution de la fissuration.

Zone I - Le comportement du prisme est quasi-élastique. Les fibres n'interviennent pas et seules les caractéristiques de la matrice régissent le comportement. Une fissuration diffuse apparaît. Cette zone prend fin quand la contrainte limite en traction de la matrice est atteinte.

Zone II - Les microfissures se localisent, ce qui conduit à la création de microfissures. Les granulats, les fibres, ainsi que les effets de volume (taille de la zone sollicitée par rapport à celle des hétérogénéités) et de gradient (étendue des contraintes dans la zone sollicitée) liés à l'essai jouent un rôle très important.

Zone III - Une microfissure, cousue par les fibres, se propage. A ce niveau, le dosage en fibres, leur orientation et le mécanisme d'ancrage sont fondamentaux. Il est important de noter que, dans le cas de dosages faibles, la reprise de la charge de fissuration implique une forte propagation de la fissure dans ai hauteur de la poutre. En effet, cela permet une montée de l'axe neutre donc du moment résistant de la section fissurée. En conséquence, la zone qui s'étend sur une distance égale à la hauteur de la fissure de part et d'autre de celle-ci se trouve déchargée, et on n'observe pas de multi fissuration serrée comme dans le cas du béton armé.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

Zone IV - La microfissure principale s'ouvre de manière importante ce qui correspond à une dégradation du renforcement, et se traduit par une rupture de pente sur le diagramme. Cette dégradation, qui est fonction de la matrice et du type de fibre employé, est liée à la rupture, à une perte d'adhérence, ou à un déchaussement des fibres. La description de ces mécanismes montre qu'une approche du type calcul à la rupture est appropriée pour ce type de matériau. Elle consiste à postuler un mécanisme de rupture et à écrire l'équilibre de structure suivant ce mécanisme. Dans le cas d'une poutre en flexion, l'apparition d'une microfissure peut être modélisée par une rotule semi-rigide.

III 3.3.4 Cas des poutres armé et renforcés de fibres

La déformation et le mode de fissuration et de rupture des poutres témoin non armé et sans fibres est illustrée par les figures (figure III 31 figure III 32 figure III 33 figure III 34 figure III 35 figure III 36 figure III 37) et les courbes de déformation sont représentées par les figures III 38, III 39 et la figure III 40.



Figure III 31 Essai de flexion sur la poutre en béton fibré et ferrailé.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



**Figure III 32 Mode de fissuration de la poutre en béton fibré et ferrillé.
(Apparitions de la fissure)**



**Figure III 33 Mode de fissuration de la poutre en béton fibré et ferrillé
(développement de la fissure)**

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques



Figure III 34 mode de rupture de la poutre béton fibré et ferrillé



Figure III 35 mode de rupture de la poutre béton fibré et ferrillé (phase de rupture)

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

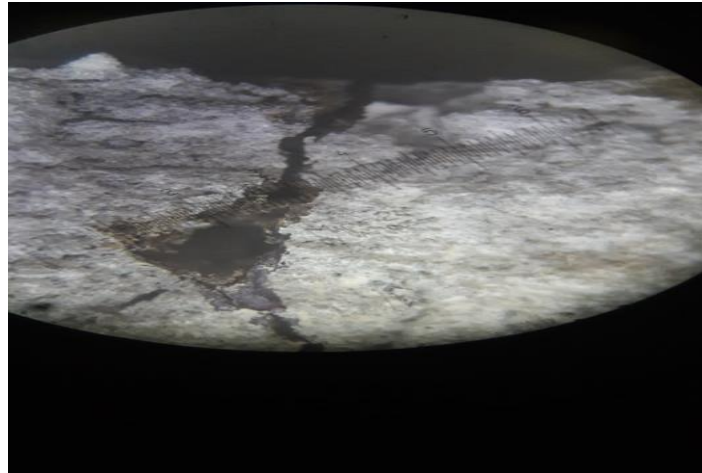


Figure III 36 Mesure Première fissure sur la poutre en béton fibré et ferrillé.

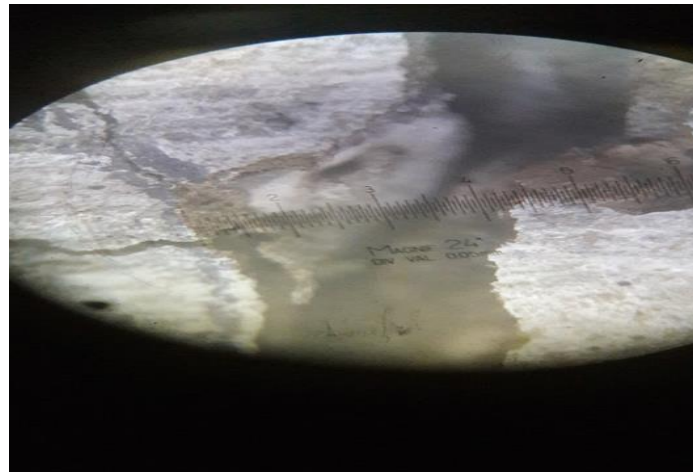


Figure III 37. Mesure Dernière fissure sur la poutre en béton fibré et ferrillé

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

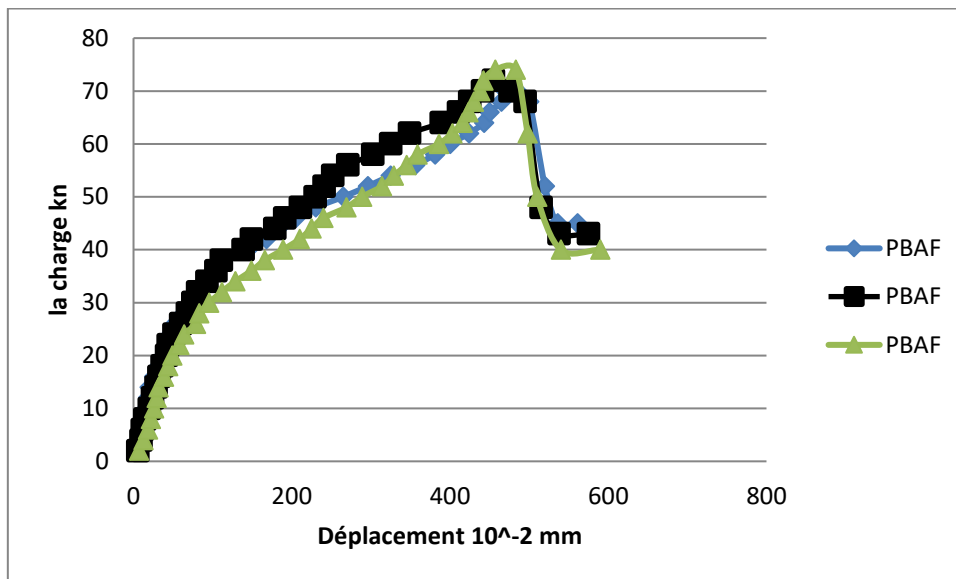


Figure III 38 Courbe charge- déplacement de la poutre béton fibré et ferrillé

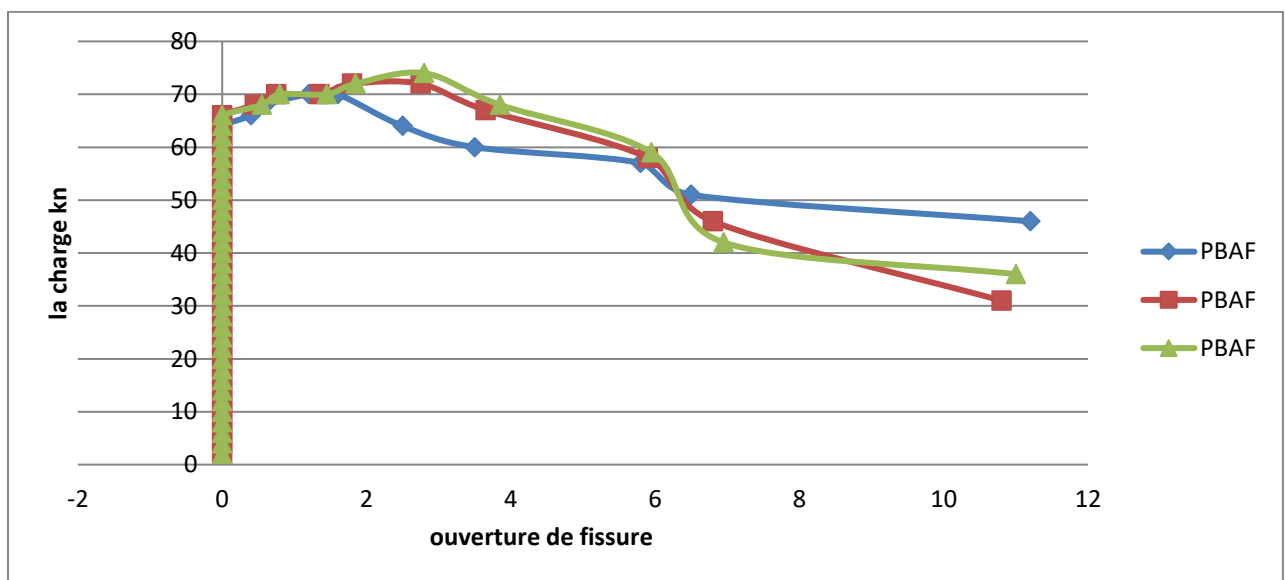


Figure III 39 courbe charge- ouverture de fissure la poutre béton fibré et ferrillé

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

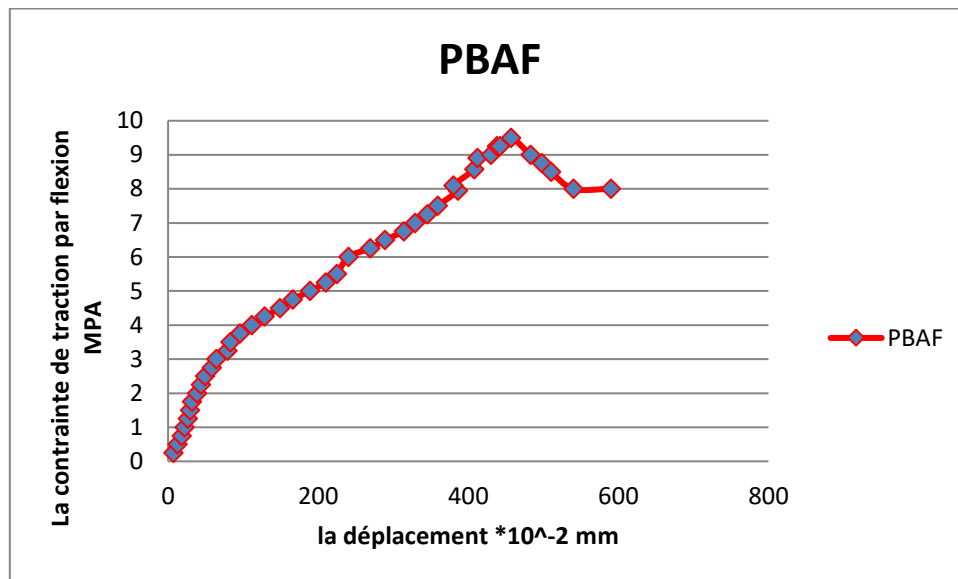


Figure III 40 courbe contrainte traction par flexion- déplacement la poutre béton fibré et ferrillé.

➤ Interprétation

La rupture des poutres armé et fibré est due à l'effort de cisaillement avec le décollement partiel de la fibre. Durant l'essai, des observations liées à la rupture peuvent être rassemblées comme suit la création des nouvelles fissures diagonales d'effort tranchant propagent vers le point d'application de la charge faisant un angle de 45° avec l'axe horizontale de la poutre (Fig. 33), à une valeur de charge de 72 kN pour P1 et 74 kN pour P3, a été caractérisé par un bruit de type craquement.

Dans la partie centrale de la poutre, la couche d'enrobage sous les armatures a été légèrement arrachée en blocs délimités par les fissures de flexion verticales (Fig. 34), dans la zone, entre le point de chargement et l'appui, une fine couche du béton ou bien des petits morceaux du béton restent collés (Fig. 32).

- La rupture des poutres a été comme prévue (les poutres se sont rompues sous un effet de cisaillement) ce qui montre l'efficacité de la fibre métallique dans la réparation et le renforcement des structures en béton armé.

La rupture de la poutre est provoquée par des fissures diagonales d'effort tranchant. Ces fissures partent de s'inclinent vers le point d'application de la charge avec un angle d'environ 45° . On observe aussi sur cette poutre, des fissures d'effort tranchant se propageant horizontalement dans le béton provoquant une légère destruction de la couche d'enrobage entre le béton et les armatures longitudinales (Fig.35).

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

III 1.3 Etude comparative :

Les courbes de déformation comparative des quatre cas de ferrailage sont représentées par les figures III.41, III.42, III.43.

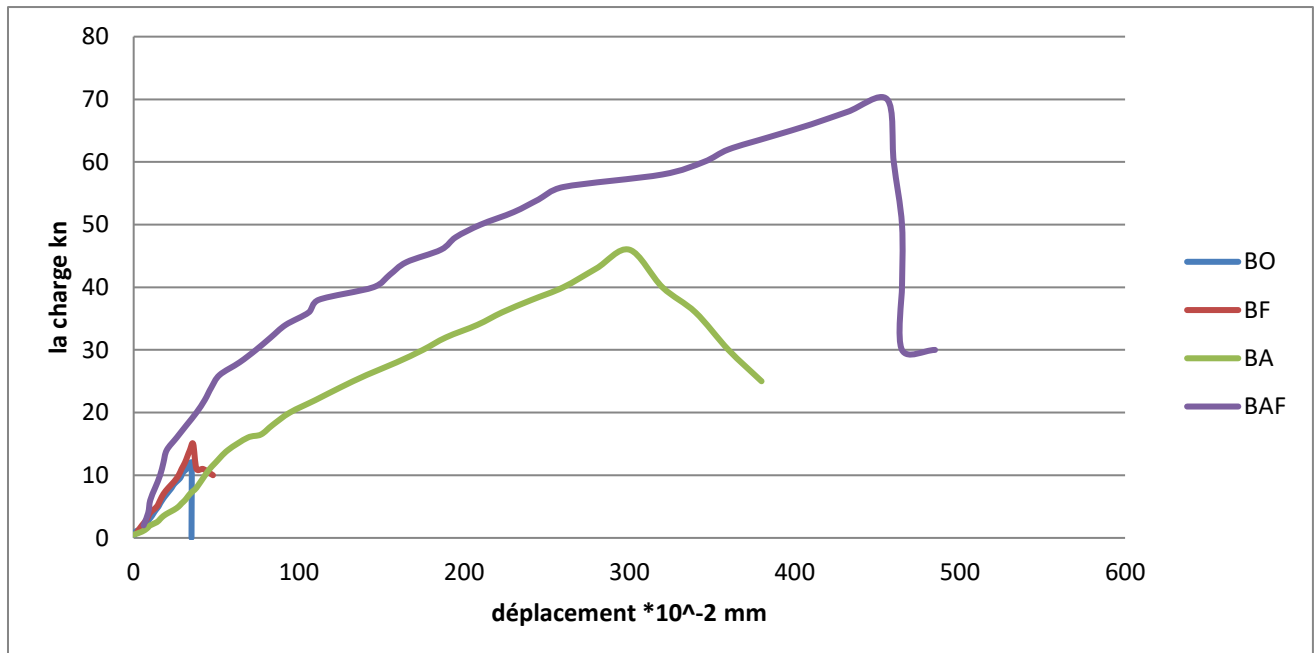


Figure III. 41 Courbe charge- déplacement de la moyenne des trois poutres

Selon la figure III.41 on peut constater que :

- les poutres de béton témoin ont une rupture brutale quand la charge atteint 12 KN comme charge maximal alors on a qu'une zone élastique.
- Les poutres de béton fibré différentes aux poutres de béton témoin elles ont une zone Erato-plastique avant la ruine.
- Les poutres de béton armé possèdent une zone élastique et une autre zone plastique ce qui explique le rôle des armatures de renforcement par comparaison des poutres de béton témoin, la charge de rupture est quatre fois des PBT.
- Les zones élastique, et plastique sont remarquable dans les courbes des poutres fibré et ferrillée à la zone tendue lorsque la charge de rupture est six fois par rapport aux poutres de béton témoin, ce qui explique l'amélioration de comportement mécanique des poutres de BAF.
- La charge de rupture PBAF est deux fois par rapport PBA dans notre cas l'incorporation des fibres améliore la ductilité des poutres BAF malgré que le ferrailage est seulement dans la zone tendue.

La résistance en traction par flexion des quatre cas de renforcement est donnée à la figure III.42.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

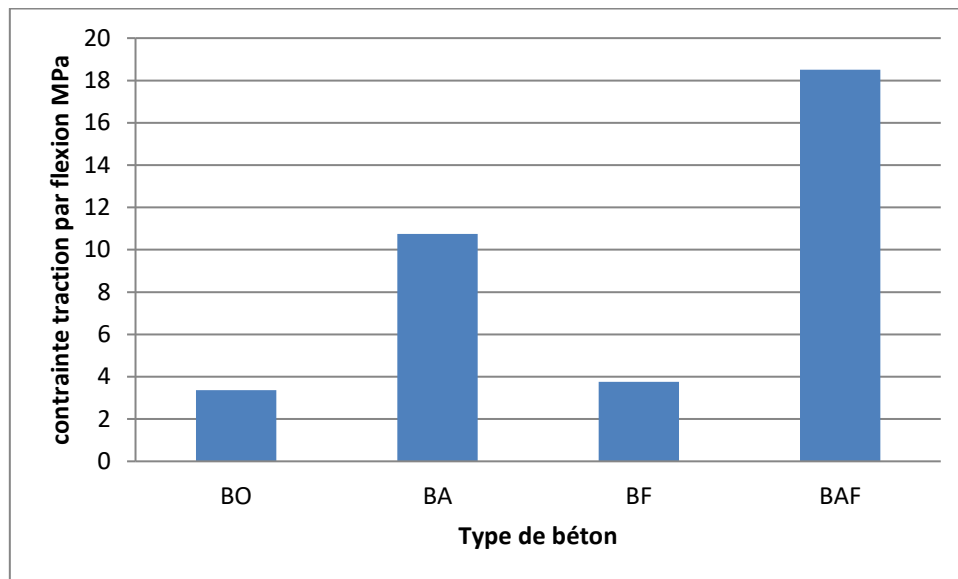


Figure III 42 courbe contrainte en traction par flexion- type de béton

Selon la figure III 42 on peut tirer les constatations suivantes :

- une amélioration de 10% de la résistance en traction par flexion de béton fibré par rapport au béton témoin est obtenue.
- une bonne résistance de traction par flexion des poutres des bétons armés. un gain de 200% est obtenu par rapport au béton témoin.
- Le béton fibré et ferrailleur a zone tendue donne les meilleures résistances en traction par flexion. un gain de 400% est obtenu par rapport au béton témoin.
- On remarque que le béton fibré et ferrailleur a la zone tendue comporte a la traction par flexion d'une façon remarquable par rapport au béton armé grâce à l'ajout des fibres qui offrent des avantages d'ordre économiques, techniques.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

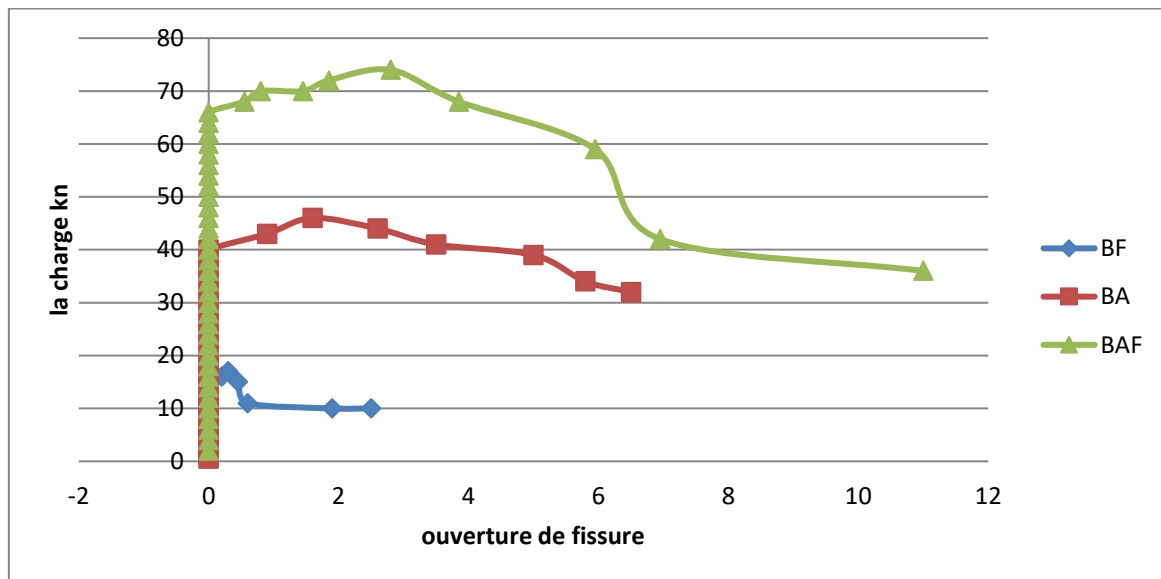


Figure III 43 courbe charge- ouverture de fissure moyenne des trois poutres

Selon la courbe charge- ouverture de fissure moyenne des poutres des quatre cas on constate que :

- toutes les courbes ont des allures similaires sur le plan forme. On peut constater sur le comportement en traction par flexion des différents types des poutres (BT. BA. BF .BAF). Avec l'utilisation d'un seul type de fibre, le paramètre principal qui affecte ce comportement est l'ajout des fibres.. Il est clair que l'ajout des fibres conduit à une amélioration des résistances en traction par flexion et par conséquent une amélioration de la ductilité.
- Dans le béton fibré il y a une légère amélioration de la ductilité lorsque les fibres s'opposent ou fissure.
- Dans le béton armé le ferrailage joue un rôle très important vis-à-vis la ductilité des poutres.
- On remarque la différence confère par l'ajout des fibres avec le renforcement de la zone tendue par les armatures qui offre aux matériaux une meilleure ductilité, les fibres aident le ferrailage à augmenter la ductilité par l'effet de couture des fissurations.

III. Chapitre 03: Comportement mécanique des poutres renforcées de fibres métalliques

CONCLUSION

La fissuration, qui est un phénomène hasardeux, peut être causée par des facteurs physiques tels que le retrait et les variations de température ou par des facteurs mécaniques directement liés au chargement. La fissuration apparaît donc comme un inconvénient majeur du matériau béton dans le sens où elle représente des voies de passage à tous les corps étrangers nuisibles, liquides ou gazeux, vers l'intérieur du béton. Suit par la suite le processus de détérioration du béton lui-même ou des aciers noyés à l'intérieur qui corrodent. Le dépôt de corrosion, à son tour, fait éclater le béton qui enveloppe les aciers et l'on assiste à un processus continu de dégradation du matériau béton armé et donc de la structure. D'une manière générale, le comportement du matériau béton vis-à-vis de la fissuration, aussi bien le béton témoin que le béton armé ou fibré, est amélioré avec l'utilisation des fibres d'acier dans le mélange. L'addition des fibres réduit la fragilité du matériau et améliore sa ductilité, qualité structurelle indispensable dans les régions à haut risque sismique. Les essais entrepris dans ce travail sur des poutres en béton témoin et en BF ont montré que l'ajout de fibres, même en faible quantité, améliore le comportement du matériau béton vis-à-vis de la traction et limite l'ouverture des fissures d'une manière appréciable. Dans ce sens, la formation des premières fissures est retardée et une fois formées, ces fissures restent très fines parce que couturées par des fibres d'aciers. Cependant l'efficacité des fibres dépend de leur direction et de leur orientation au tour de la fissuration ainsi que de leur forme et de leur dimension. Cette même distribution des fibres à l'intérieur du matériau dépend de la maniabilité du mélange à l'état frais. La dimension des fibres varie en sens inverse avec la maniabilité. Dans un mélange sec, les fibres ne peuvent pas être distribuées uniformément dans le matériau. Le remplacement d'une partie d'armature passive (partie comprimée) par les fibres métallique ondulées a amélioré le comportement mécanique des poutres et présente un avantage économique et structurel.

Conclusion Générale

Cette étude expérimentale est consacrée à l'étude du comportement mécanique des poutres armé et/ou renforcé de fibres métalliques. Ce renforcement offre des avantages d'ordre économiques et techniques.

Deux principaux objectifs sont visés par ce travail de recherche réalisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude. Le premier objectif vise le remplacement partiel des armatures passives par des fibres métallique ondulées et la deuxième objectif concerne l'amélioration des performances mécanique et le comportement post-fissuration des poutres renforcés de fibres métalliques ondulées.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude expérimentale nous permettent de tirer les conclusions suivantes:

- L'ajout des fibres métalliques confère au béton à l'état frais une cohésion du mélange ce conduit à une diminution la maniabilité du béton à l'état frais. L'incorporation des fibres engendre une augmentation de la masse volumique.
- Résistance mécanique: Les résistances mécaniques des bétons fibrés sont améliorées par l'introduction de fibres métalliques notamment en traction par flexion.

L'augmentation de la teneur en fibres conduit à une amélioration de la ductilité et de la réponse post-fissuration par contrôle de l'ouverture de fissure et sa propagation. Cela permet de reprendre les efforts de traction significatifs dans les éléments fléchis, ce qui rend possible la réduction de la section des armatures traditionnelles.

- Résistance à la flexion et ductilité: Les fibres améliorent la ductilité du béton.

Autrement dit, elles permettent au béton fibré de se déformer sans se rompre.

- La formulation joue un rôle de plus en plus important sur la qualité du béton fibré, tant sur l'obtention du niveau de performance que sur leurs régularités pendant la construction des ouvrages.
- La rupture des poutres de béton témoin a été brutale et se produit au milieu de l'échantillon.
- La formation des premières fissures est retardée et une fois formées, ces fissures restent très fines parce que couturées par des fibres d'aciers.

Cependant l'efficacité des fibres dépend de leur forme et de leur direction et de leur orientation au tour de la fissuration ainsi que de leur forme et de leur dimension. Cette même distribution des fibres à l'intérieur du matériau dépend de la maniabilité du mélange à l'état frais. La dimension des fibres varie en sens inverse avec la maniabilité. Dans un mélange sec, les fibres ne peuvent pas être distribuées uniformément dans le matériau.

Conclusion Générale

- Le remplacement d'une partie d'armature passive (partie comprimée) par les fibres métallique ondulées a bien amélioré le comportement mécanique des poutres et présente un avantage économique et structurel.
- Dans le cas d'une structure soumise à des efforts de flexion importants et pour laquelle le dimensionnement à l'état limite ultime (grandes ouvertures de fissure) est prépondérant, l'efficacité mécanique des fibres métalliques est inférieure à celle obtenue par des armatures positionnées de manière optimale vis-à-vis des fissures de flexion. En fait, les fibres sont intéressantes pour remplacer les armatures complexes à mettre en œuvre (main-d'œuvre importante) et dont l'efficacité mécanique n'est pas à la mesure des sollicitations appliquées.
- Ainsi, les BFM peuvent-ils ainsi reprendre les efforts dus aux sollicitations secondaires, comme le cisaillement ou le poinçonnement. Les fibres métalliques peuvent alors remplacer tout ou partie des armatures secondaires (cadres d'effort tranchant, aciers de confinement, etc).
- La structure mixte armatures-fibres présente d'autres points intéressants:
- - L'homogénéité obtenue avec un BFM permet de mettre en place des armatures de flexion d'un diamètre supérieur (8) et de diminuer ainsi, dans certains cas, les couts de main-d'œuvre.
- - Dans son fonctionnement en service, une structure mixte armatures-fibres présente des ouvertures de fissure nettement moindres que celles d'une structure en béton armé classique. Ce qui augmente sa durée de vie.
- - La synergie entre les fibres et les armatures améliore la liaison béton-armature. D'où un meilleur comportement sous sollicitation de fatigue répétée de la structure mixte, comparé à celui d'une structure classique en béton armé.
- La suppression totale ou importante des cadres d'effort tranchant permet " d'éviter " l'âme d'une poutre ou la zone d'effort tranchant, outre le gain en poids et en coût de matière, ces " évidements " peuvent être utilisées pour faire passer des gaines techniques.
- Optimiser l'efficacité mécanique du couple fibres-armature nécessite de repenser la stratégie globale du renfort d'une section. En , effet, le fait que les fibres ont une action sur la reprise des moments de flexion permet de faire remonter les armatures de flexion dans la section, les éloignant ainsi de la surface. Ce choix technique accroît la protection des armatures et la durée de vie la structure, en faisant davantage participer les aciers de flexion à la reprise de l'effort tranchant.

Références Bibliographiques

- [1] : N.MAKHLOUF, Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux, Thèse de magister 2010. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [2] : F. GABRYSIK, Matériaux- Les Bétons, chapitre 04, Strasbourg, 2005.
- [3] : P.K. MEHTA, " Concrete: structure, properties, and materials ", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey,1986, 450p.
- [4] : E.N. ANTOINE, Fibre reinforced for concrete, Concrete International design and Construction, Michigan,1985, Vol 7, N° 3, pp.21-25.
- [5] : ACI COMMITTEE, State of the art report on fibre reinforced concrete, American Concrete Institute. , Philadelphia, 1984, pp.140-146.
- [6] : M. BRAUN & A. MAJDIC , Reinforcing castables with stainless steel fibres ,Intercera, 1980, Vol 129, pp.113-118..
- [7] : H.F. PORTER, Preparation of concrete from selection of materials to final disposition. American Concrete Institute. 1910, Vol. 6, 296p.
- [8] : D.R. LANKARD & H.D. SHEETS ; Use of steel wire fibres in refractory castables . Am. Cer. Soc, 1971, Vol. 63, No.7.
- [9] : Pascal Casanova. Bétons renforcées de fibres métalliques : Ecole nationale de ponts et chaussées, Paris, 1995.
- [10] : SACI. R ; Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton , mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [11] : LAFARGE ; Le béton et la démarche HQE.
- [12] : AIT AMEUR, Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales. Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.
- [13] : BOUCHEKOUK, Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymère thermoplastiques, thèse doctorat, INSA de Lyon, France, 1992
- [14] : BOUZEROURA .M. Etude du comportement du béton de fibres ondulées. Proposition d'une relation simplifiée contrainte-déformation, Magistère en génie civil, Université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [15] : BLEDZKI, A. K and GASSAN. J., Composites reinforced with cellulose based fibers ,ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.

Références Bibliographiques

- [16] : DEBICKI.G, Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration des matériaux. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1988.
- [17] : CASANOVA.P, LEMAOU.F, SCHALLER.I, Les fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans les poutres de béton armé, bulletin de liaison L.C.P.C, N° 195 Jan.-Fev, 1995.
- [18] : ASB. Association du béton Québec. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, Bibliothèque nationale du Québec, Québec, 2005.
- [19] : A. BOUHERAOUA, Effets des fibres bi-ondulées sur le comportement du béton, étude expérimentale, Thèse de magister 2006, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [20] : P. ROSSI, N. HARROUCHE, F. LEMOU (1989), "Comportement mécaniques des bétons armé de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annales de L'ITBTP, N° 479, 1989.
- [21] : A. ADJRAD, Renforcement du béton par des copeaux métalliques, étude expérimentale et modélisation", Thèse de magister 2000. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2000.
- [22] : FRANÇOIS TOUTLEMONDE et JACQUES RESPLENDINO WILEY, Les bétons : formulation-fabrication et mise en œuvre, Tome2, COLLECTION TECHNIQUE CIM BÉTON. Centre d'information sur le béton et ses applications, Paris, 2013.
- [23] : Laboratoire de Géotechnologie, ESSAI BRESILIEN (TRACTION INDIRECTE), Institut de Mécanique et de Génie civil, Université de Liège, Liège, 2015.
- [24] : BOUZEROURA .M. Etude du comportement du béton de fibres ondulées. Proposition d'une relation simplifiée contrainte-déformation, Magistère en génie civil, Université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [25] : BLEDZKI, A. K and GASSAN. J., Composites reinforced with cellulose based fibers ,ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.
- [26] : DEBICKI.G, Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration des matériaux. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1988.

Références Bibliographiques

- [27] : CASANOVA.P, LEMAOU.F, SCHALLER.I, Les fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans les poutres de béton armé, bulletin de liaison L.C.P.C, N° 195 Jan.-Fev, 1995.
- [28] : ASB. Association du béton Québec. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, Bibliothèque nationale du Québec, Québec, 2005.
- [29] : A. BOUHERAOUA, Effets des fibres bi-ondulées sur le comportement du béton, étude expérimentale, Thèse de magister 2006, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [30] : P. ROSSI, N. HARROUCHE, F. LEMOU (1989), "Comportement mécaniques des bétons armé de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annales de L'ITBTP, N° 479, 1989.
- [31] : A. ADJRAD, Renforcement du béton par des copeaux métalliques, étude expérimentale et modélisation", Thèse de magister 2000. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2000.
- [32] : FRANÇOIS TOUTLEMONDE et JACQUES RESPLENDINO WILEY, Les bétons : formulation-fabrication et mise en œuvre, Tome2, COLLECTION TECHNIQUE CIM BÉTON. Centre d'information sur le béton et ses applications, Paris, 2013.
- [33] : Laboratoire de Géotechnologie, ESSAI BRESILIEN (TRACTION INDIRECTE), Institut de Mécanique et de Génie civil, Université de Liège, Liège, 2015.
- [34] Wu Yao; Jie LI; and Keru Wu, 2003, "Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced
- [35] concrete at low fiber volume", Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp 27-30
- [36] Weichen X.; Liang L.; Bin C.; and Jie L., 2008, "the reversed cyclic load tests of normal and
- [37] pre-stressed concrete beams", Engineering Structures, Vol.30, pp 1014-1023
- [38] Yoon-Keun K.; Marc O. E.; Woo-Suk K.; and Jubum K., 2002, "Shear Strength of Steel
- [39] Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Structural Journal, V. 99, No. 4, pp
- [40] 530-538

Références Bibliographiques

- [41] Y. Hua; J.Y. Lian; and T.Q. Zhou, 2005, “Relationship between the mechanical properties of
- [42] hybrid fiber reinforced concrete and length/diameter aspect ratio of hybrid fiber”, Jianzhu
- [43] Cailiao Xuebao/J. Build.Mater. Vol. 8, No.1, pp. 71–76
- [44] Y. Mohammadi, S.P. Singh, S.K. Kaushik, 2008, “Properties of steel fibrous concrete
- [45] containing mixed fibres in fresh and hardened state”, Construction and Building Materials,
- [46] Vol. 22, pp 956–965
- [47] Zhijian Li, X. Wang and L. Wang, 2006, “Properties of hemp fiber reinforced concrete
- [48] composites”, Composites: Part A, Vol. 37, pp 497-505
- [49] Zongjin Li, Faming Li, T.Y. Paul Chang, and Yiu-Wing Mai, 1998, “Uniaxial tensile
- [50] behaviour of concrete reinforced with randomly distributed short fibers”, ACI Material
- [51] Journal, V. 95, No. 5, pp 564-574.