

Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou
Faculté Génie de la Construction
Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

EN GENIE CIVIL
Option : Structures et Matériaux

Présenté par

Madame **MAKHOLOUF Née CHERGUI NADIA**

THEME

CARACTERISATION EN STATIQUE DU COMPORTEMENT EN TRACTION DIRECTE DU BETON ARME DE FIBRES EN COPEAUX

Devant le jury d'examen suivant :

Mr KACI Salah	Professeur UMMTO	Président
Mr BOUAFIA Youcef	Professeur UMMTO	Rapporteur
Mr MEHADDENE Rachid	Maître de conférences UMMTO	Examineur
Mr DERRADJ Mohammed	Maître de conférences UMMTO	Examineur
Mr DJEBALI Said	Chargé de recherches UMMTO	Invité

Soutenue le 30 / Novembre / 2010

DEDICACES

A, ma mère, mon père, mon mari et à mes chères et adorables filles Sofia, Sarah et Silia qui ont partagé avec moi les moments difficiles, à mes sœurs, mes frères et belles sœurs qui m'ont soutenue et encouragé durant ce travail.

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord Monsieur Youcef BOUAFIA, professeur à l'UMMTO qui a dirigé ce mémoire. Je lui suis très reconnaissante pour les orientations et les conseils qu'il m'a prodigué tout au long de ce travail.

Que Messieurs les membres du jury qui ont accepté de lire et de juger ce mémoire en soient remerciés.

Un grand merci à mon mari Saïd MAKHLOUF, pour son soutien et surtout pour son aide au laboratoire durant la tâche la plus ardue qui est la confection des éprouvettes.

Je remercie messieurs MAMOU, DJEBALI et ATLAOUI pour avoir été disponibles et m'avoir secondée dans la réalisation des éprouvettes et la conduite des essais mécaniques.

Enfin, je rends hommage à ma famille, mes filles et mes amis pour leur soutien moral tout le long de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	03
I.1. GENERALITES SUR LE BETON ET LE BETON DE FIBRES	03
I.1.1. Généralités sur le béton.....	03
I.1.2. Généralités sur le béton armé.....	03
I.1.3. Généralités sur le béton renforcé de fibres.....	05
I.1.4. Connaissance du matériau.....	06
I.2. DIFFERENTES NATURE DE FIBRES	07
I.2.1. Fibres minérales.....	07
I.2.2. Fibres végétales.....	07
I.2.3. Fibres synthétiques.....	07
I.2.4. Fibres artificielles.....	07
a) Fibres d'amiante.....	08
b) Fibres de cellulose.....	08
c) Fibres de polypropylènes.....	08
d) Fibres de verre.....	09
e) Fibres métalliques.....	09
I.3. DOMAINES D'UTILISATION DU BETON RENFORCE DE FIBRES	10
I.4. COMPORTEMENT MECANIQUES DES BETONS DE FIBRES	11
I.4.1. Effet des fibres dans une matrice.....	11
I.4.1.1. Rôles des fibres dans le béton.....	11
I.4.1.2. La taille et la rugosité des granulats.....	12
I.4.1.3. Influence de l'adhérence fibre - matrice.....	13
I.4.1.4. Influence de la géométrie de la fibre.....	13
I.4.1.5. Mécanisme de rupture d'une fibre dans la matrice.....	14
I.4.2. Résistance des bétons de fibres en compression.....	15
I.4.3. Essais de traction par Flexion.....	18
I.4.3.1. Influence du type de fibres.....	20
I.4.3.2. Influence de la longueur des fibres.....	20
I.4.3.3. Influence du pourcentage en fibres.....	21
CONCLUSION	22
CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE	23

II.1. INTRODUCTION.....	23
II.2. ETUDE DE LA COMPOSITION DU BETON	23
II.2.1. Introduction	23
II.2.1.1. Les liants	24
II.2.1.2. Les sables	24
II.2.1.3. Les granulats.....	25
II.2.1.4. Les adjuvants.....	25
II.2.2. Analyse granulométrique.....	26
II.2.2.1. Principe de l'essai	26
II.2.2.2. Équipements utilisés.....	26
II.2.2.3. Description de l'essai.....	26
II.2.2.4. Module de finesse.....	28
II.2.3. Composition du béton par la méthode de Dreux-Gorisse... ..	28
II.2.3.1. Résistance visée.....	28
II.2.3.2. Dosage en ciment et en eau.....	30
II.2.3.3. Dosage des Granulats.....	33
II.2.3.4. Fibres utilisées.....	34
II.3. OPTIMISATION DU BETON DE FIBRES	36
II.4. MESURES ET CONTROLES DE L'OUVRABILITE (MANIABILITE) DU BETON DE FIBRES	38
II.4.1. Méthode d'évaluation de l'ouvrabilité du béton de fibres.....	38
II.4.2. Description de l'appareil « maniabilimètre » du LCPC.....	39
II.4.3. Préparation et Mesure de l'ouvrabilité du béton de fibres.....	40
II.4.4. Interprétation des courbes et discussion.....	46
II.5. PREPARATION DU BETON RENFORCE DE FIBRES METALLIQUES	48
II.5.1. Mode opératoire du béton.....	48
II.5.2. Préparation des éprouvettes.....	48
II.6. ESSAIS MECANIQUES.....	50
II.6.1. Essais de compression	50
II.6.1.1. But de l'essai.....	50
II.6.1.2. Principe de l'essai.....	50
II.6.1.3. Résultats des essais en compression	52
II.6.1.4. Interprétation des courbes et discussion.....	55
II.6.2. Essais de traction directe.....	56
II.6.2.1. But de l'essai.....	56
II.6.2.2. Principe de l'essai.....	56

II.6.2.3. Résultats des essais en traction.....	59
II.6.2.4. Interprétation des courbes et discussion.....	64
II.6.3.Comparaison des valeurs du module de Young (valeurs mesurées, valeurs calculées en compression et en traction).....	66
CONCLUSION.....	66
CONCLUSION GENERALE.....	67
BIBLIOGRAPHIE	

Résumé

L'objet de cette étude est de rechercher un compromis pour une bonne maniabilité du béton de fibres et pour une meilleure résistance à la traction. Le travail effectué consiste en la réalisation de plusieurs séries d'éprouvettes, en faisant varier les pourcentages de fibres et la composition du mélange de béton (avec des rapports S/G (Sable /Gravier) différents et le rapport E/C (Eau /Ciment) fixe). Les fibres utilisées proviennent des copeaux métalliques récupérés dans les ateliers d'usinage de la SNVI de Rouiba sous forme de rouleaux cylindriques de diamètre 0,8 à 0,9 cm. Leur forme hélicoïdale leur confère un meilleur ancrage dans le béton. Plusieurs séries d'éprouvettes en béton, renforcées par ces fibres et à différents pourcentages et différentes compositions ont été réalisées. Des essais de traction et compression ont été effectués sur ces éprouvettes. L'étude de la maniabilité a permis de déterminer la composition optimale du béton de fibres et ce en fonction du temps d'écoulement du matériau à l'état frais. Les essais de traction directe ont permis de suivre le comportement de ce matériau au delà de la fissuration. Le palier de ductilité est également mis en évidence sur les courbes obtenues.

Mots clés : *essais mécaniques, montage expérimental, traction directe, déformation contrôlée, fibres en copeaux, béton.*

Abstract

In this study, the required object is to find a compromise between good fiber concrete handiness and a better tensile strength. Carried out work consists of the realization of several series of test-tubes, while varying the percentages of fibers and the mix design of concrete (with report/ratio S/G (Sand/Graver) different and fixed report/ratio E/C (water/Cement)). The used fibers come from the metal chips recovered in the machining workshops of SNVI company (Rouiba, Alger), in the rollers cylindrical form with 0,8 to 0,9 cm diameter. Their helicoidally form confers a better anchoring in the concrete. Several series of concrete test-tubes, reinforced by these fibers and with various percentages and various compositions were carried out. Compression and tensile tests were carried out on these test-tubes. The handiness study made it possible to determine the optimal composition of the fiber concrete according to flow time in the material at fresh state. The direct tensile tests made it possible to follow the material behavior beyond cracking. The ductility landing is also highlighted on the curves obtained.

Key words: *mechanics tests, experimental assembly, straight tensile, control deformation, turning fibres, concrete.*

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Depuis sa première mise en œuvre, au *Ier siècle av. J.C.*, le béton a été réalisé à partir des composants de base qui sont : le ciment, l'eau et les granulats. Le béton est donc par excellence un matériau composite puisque sa matrice est composée en partie de granulats de différentes dimensions, du sable et de la pâte cimentaire. Contrairement à d'autres matériaux de construction tels que le bois ou autres, ce matériau est présent dans tous les domaines de la construction, que ce soit dans le bâtiment industriel ou d'habitation, dans les murs de soutènement ou dans les ouvrages d'art comme les ponts, les tunnels et les barrages ou encore dans les pavés de trottoirs ou des pistes d'aérodromes.

Si le matériau est plastique, donc facilement modulable lors de sa fabrication, il acquiert ses propriétés de résistance au cours du temps. Une fois mature, le béton devient un bloc massif dont les propriétés dépendent, en grande partie, de sa composition de départ [1].

Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance à la compression mais présente une faible résistance à la traction. Non renforcé par l'acier, ce matériau demeure fragile et vulnérable, sous l'effet d'efforts importants comme dans le cas des secousses sismiques. Sa rupture est brutale et se manifeste par des fissurations sans déformation préalable de la matrice.

Pour éviter ce phénomène de rupture ainsi que pour pallier sa faible résistance en traction et pour contenir une macro fissuration stable dans les zones tendues, le béton doit être renforcé dans la plupart des cas par des armatures.

Depuis plus de trois décennies, des fibres tant métalliques que plastiques ou autres ont été incorporées dans les bétons. L'utilisation de ces bétons renforcés de fibres a connu diverses applications. On peut citer les dallages industriels, la réparation des canalisations d'assainissement, la projection sous voûte dans les tunnels, la réalisation de chaussées entièrement faites en béton de fibres, des chaussées d'autoroutes ou chaussées de parkings aéronautiques [2].

Le renforcement des bétons par des fibres améliore leur résistance à la traction. Durant l'apparition et la propagation des microfissurations, ces fibres peuvent couvrir les microfissures actives qui retardent l'apparition des macros fissurations et éviter ainsi la

rupture brutale. Néanmoins, l'incorporation des fibres métalliques dans le béton frais a une influence directe sur sa maniabilité qui se traduit par une mise en œuvre souvent difficile.

L'objet de notre étude est de rechercher un meilleur compromis entre une bonne maniabilité du béton et une meilleure résistance à la traction. Le travail effectué consiste en la réalisation de plusieurs séries d'éprouvettes, en faisant varier les pourcentages de fibres et la composition du mélange de béton (avec le rapport S/G -Sable /Gravier- différent et le rapport E/C – Eau/Ciment- fixe).

Dans cette étude les fibres utilisées proviennent des copeaux métalliques récupérés dans les ateliers d'usinage de la SNVI de Rouiba, sous forme de rouleaux cylindriques de diamètre 0,8 à 0,9 cm. Etirés, ceux-ci prennent la forme d'un serpentín qu'on coupe ensuite pour obtenir des fibres de 5cm de longueur comportant en moyenne huit ondulations. Cette forme hélicoïdale leur confère un meilleur encrage dans la matrice. Plusieurs séries d'éprouvettes en béton, renforcées par ces fibres à différents pourcentages et différentes compositions, ont été réalisées. Des essais de traction et compression ont été par la suite effectués sur ces mêmes éprouvettes.

Le premier chapitre de ce travail est consacré à l'étude bibliographique qui fait une synthèse sur l'état de l'art sur les bétons en général et les bétons de fibres métalliques en particulier.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale, dans laquelle on décrit la méthode dite "Dreux-Gorisse", utilisée pour le calcul des masses des composants du béton. On optimise la composition ainsi obtenue en utilisant la méthode de BARON-LESAGE puis, on détermine la masse des fibres à incorporer dans le béton pour les pourcentages 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; et 0,8% en volume. C'est dans cette partie qu'on s'intéresse à la maniabilité du béton en utilisant le maniabilimètre développé au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris). Puis, des essais de compression et de traction sont réalisés sur des éprouvettes à l'âge de 28 jours. Les différentes courbes contrainte- déformation ont été enregistrées pour chaque type d'essai et y sont interprétées.

Enfin une conclusion générale est proposée avec quelques perspectives. Elle met en évidence la composition optimale du béton avec un pourcentage de fibres adéquat pour un meilleur compromis maniabilité- résistance à la traction.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. GENERALITES SUR LE BETON ET LE BETON DE FIBRES

I.1.1. Généralités sur le béton

Le béton, depuis son origine, a été réalisé à partir des composants de base 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 taille de grains comprise entre 1 et 5 mm et les granulats ou graviers de grosseur comprise entre 5 et 25mm.

Les romains le confectionnaient à partir de la chaux, de céramique écrasée et de sable volcanique (Vitruvius "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 pouzzolanique, 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.

I.1.2. Généralités sur le béton armé

La mise en œuvre du béton armé est généralement attribuée 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 [3].

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 [4,5], 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 [4]. Dans d'autres sources [5,6], 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 [7], ont rapporté que la paille a été rajoutée dans des matériaux de construction tels que le mortier, le plâtre ...etc.

JOSEPH LAMBOT [5] 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.

Vingt sept ans après, l'américain A. BERNARD [5] est parvenu en Californie (U.S.A), à créer une pierre artificielle par l'ajout de 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, [8], 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).

En 1963, deux articles ont été publiés par ROMUALDI et BATSON [9,10], le premier, sous le titre, "The mechanics of crack arrest in concrete", le deuxième s'intitule "Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforced". Dans ces deux articles, une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Development Corporation a été validée avec des données expérimentales obtenues à partir de l'essai de flexion. Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de ROMUALDI, BATSON et MANDEL et d'autres. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier comme des essais pilotes en déformation, les chercheurs sont arrivés à mettre en évidence les propriétés nouvelles de ce composite. Ils ont décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile.

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 [11]. 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 coudre les macrofissures (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.

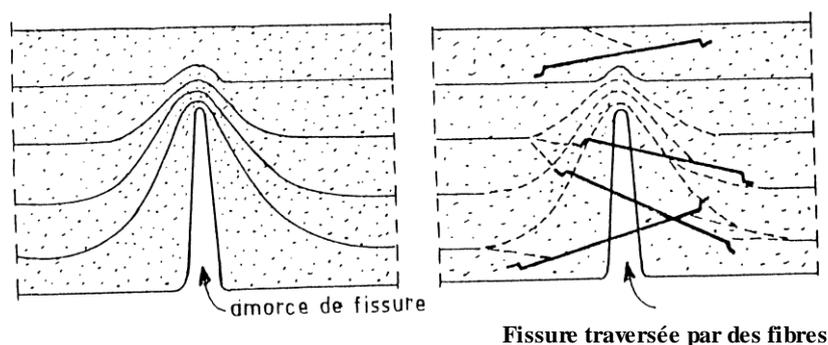


Figure I.1 : Rôle des fibres dans la matrice de béton

I.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 micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont:

I.2.1. Fibres minérales: Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisées pour l'isolation et lignifugeage, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes.

I.2.2. 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).

I.2.3. Fibres synthétiques : Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, acryle, polyster ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géantes dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion.

I.2.4. Fibres artificielles : Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Ci-après nous allons présenter les principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

a) 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 bâchettes 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 micro-organismes, 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'égoût, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.

b) Fibres de cellulose.

Les fibres de cellulose sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme un additif au ciment d'amiante et non pas comme un renfort. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments. Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm, alors que l'élanement peut être dans les environs de 100. Leurs résistances en traction varient entre 10 et 30 MPa. Elles sont très efficaces dans l'amélioration de la résistance mécanique d'un composite. Cette amélioration est réalisée essentiellement par le freinage des fissures.

c) Fibres de polypropylènes

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants: bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

d) 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 μm . 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,
- conductivité thermique relativement faible.

e) 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. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre, ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont le plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1 mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celles commercialisées par la société Bekaert sous la marque "Dramix" ou des fibres ondulées telles que celles commercialisées par la société Trefil Arbed. Cette société fabrique également une fibre commercialisée sous la marque "Twin-set" qui possède un cône indéformable à chacune de ses extrémités. Ce type d'ancrage est beaucoup plus rigide que l'ancrage obtenu par des crochets ou des ondulations.

I.3. DOMAINES D'UTILISATION DU BETON RENFORCE DE FIBRES

Depuis le concept de béton de fibres a été conçu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de fibres d'acier dans une matrice de béton permet au composite (béton-fibres) d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion. Mais ce type de béton n'est pas considéré comme un substituant aux bétons traditionnels, mais comme un matériau nouveau type, qui devient intéressant dans l'optique de la conception d'une structure performante.

Dans le tableau N° I.1 ci-dessous, on indique quelques sites où le béton de fibres a été utilisé.

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 exp: 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.
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux hautes températures.	<ul style="list-style-type: none"> - remplacement avec succès du revêtement réfractaire, - diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	<ul style="list-style-type: none"> - évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé, - diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fabrication des pieux, revêtement ignifuges isolants (construction navale). Panneaux de revêtement de façade...etc.	<ul style="list-style-type: none"> - augmentation de la résistance aux chocs, - augmentation de la résistance à l'usure, - augmentation de la durabilité de revêtement.

I.4. COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES

I.4.1. Effet des fibres dans une matrice

I.4.1.1. Rôles des fibres 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.

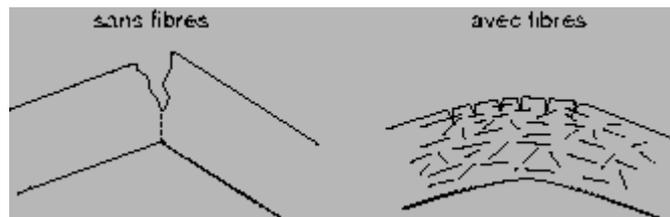


Figure I.2: Fissuration dans le béton sans et avec fibres

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 I-2.
- la transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir figure I-3.

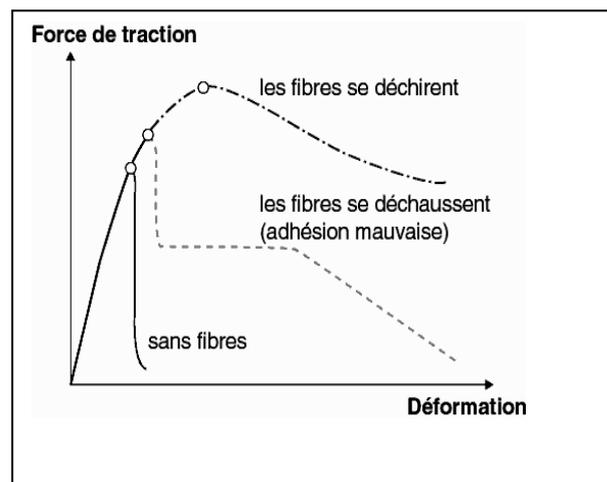


Figure I.3: comportement de charge-déformation de béton avec fibres et béton sans fibres.

I.4.1.2. 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 de 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 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 .

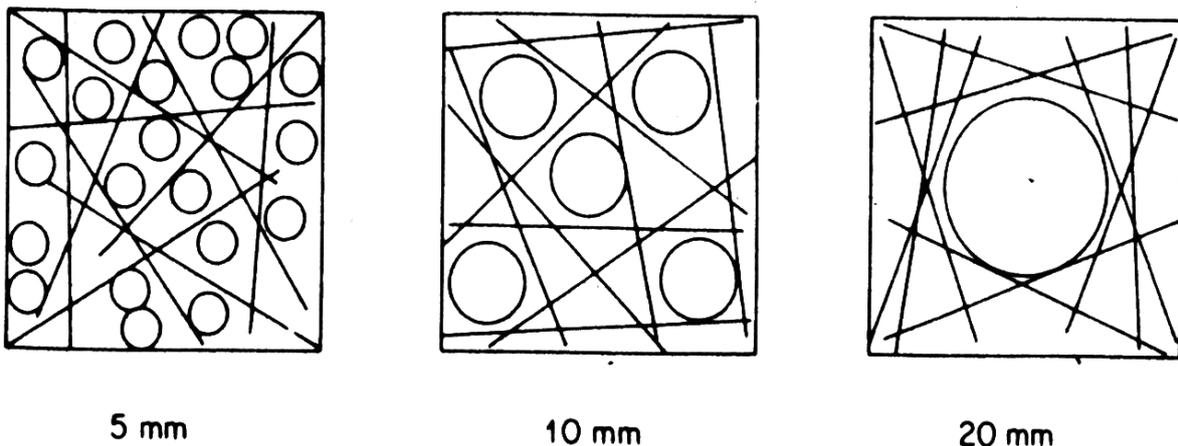


Figure-I.4: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.

I.4.1.3. 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. D'après Bartos (1981), l'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons [4]:

- 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 [7].

I.4.1.4. 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.

I.4.1.5. 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».

Ces essais peuvent nous ramener à déterminer des relations entre divers paramètres géométriques et mécaniques utilisables et permettre de définir et déterminer les coefficients d'efficacité des fibres.

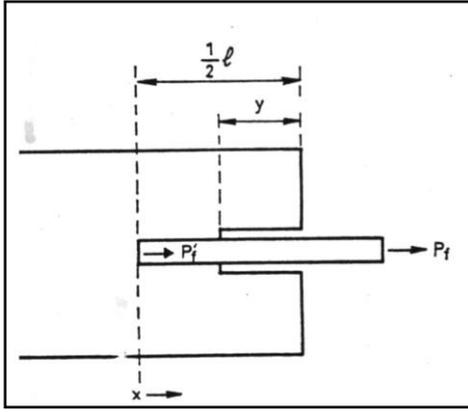


Figure I.5: Géométrie d'une fibre décollée de matrice sur une longueur y

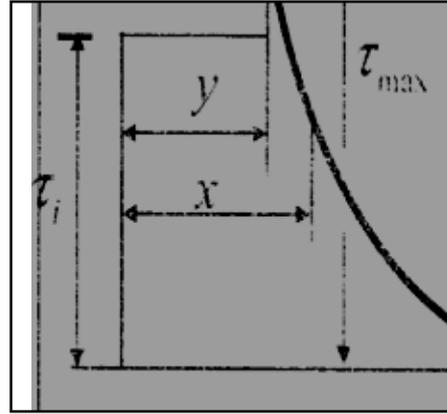


Figure I.6: Distribution des contraintes d'adhérence après décollement

Le modèle mathématique associé au mécanisme du décollement des fibres suppose un comportement élastique de la matrice et des fibres, lorsque le composite est soumis à un effort de traction. Les contraintes latérales de la matrice et des fibres sont négligées, c'est-à-dire que le transfert des contraintes de la matrice vers les fibres se traduit uniquement par des contraintes de cisaillement à l'interface fibre-matrice.

Les figures I.5 et I.6 schématisent le principe de ce concept. Le mécanisme du décollement de la rupture de la fibre est le suivant :

1. Rupture de la fibre ($l \geq l_c$): la longueur critique l_c définit une longueur pour laquelle la fibre atteint sa contrainte de rupture σ_{fu} pourvu que la contrainte de cisaillement maximale τ_{max} reste inférieure à une valeur τ_u de cisaillement ultime à l'interface fibre-matrice. Dans ces conditions, il n'y aura pas de décollement, mais rupture de la fibre.
2. Décollement partiel ($l < l_c$): ici, il y a décollement si la force exercée sur la fibre est telle que τ_{max} ($x=0.5$) égale à la contrainte τ_u contrainte de cisaillement ultime à l'interface. Le décollement se poursuit tant que τ_{max} (dont la valeur décroît au fur et à mesure que l'ancrage diminue) n'est pas inférieur à τ_u .
3. Décollement catastrophique: il existe une longueur d'ancrage particulière, $l_{min}/2$ pour laquelle le décollement se poursuit sans accroissement de P_f . Cette longueur, qui dépend du rapport τ_u/τ_i , est donnée par des relations rapportées dans les travaux de LAWRENCE. D'autres théories basées sur des modèles mathématiques purs ou bien sur des simulations ont été rapportées. Mais en général, ces modèles et ces théories ont permis de bien comprendre le comportement de la fibre ancrée dans une matrice durcie.

I.4.2. 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 [12] :

- 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 rupture. Cela nous permet de dire que le module de Young est insensible à la présence des fibres durant cette phase.
- 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 I.7.

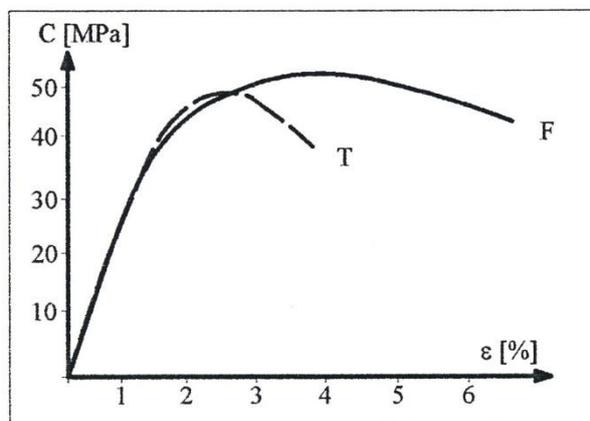


Figure I.7: Courbe contrainte déformation en compression simple (SERNA ROS, 1984).

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 [12].

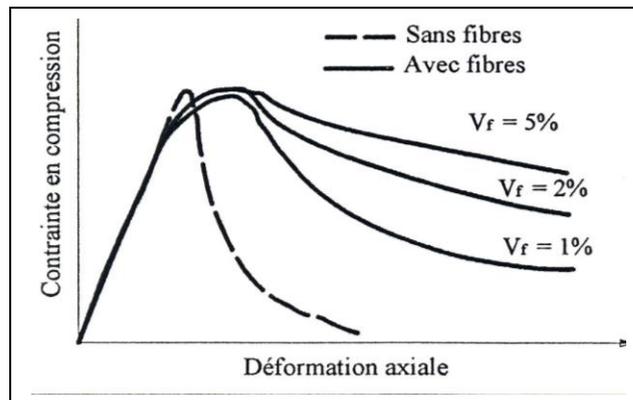


Figure I.8: Influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression [4].

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%) [12].

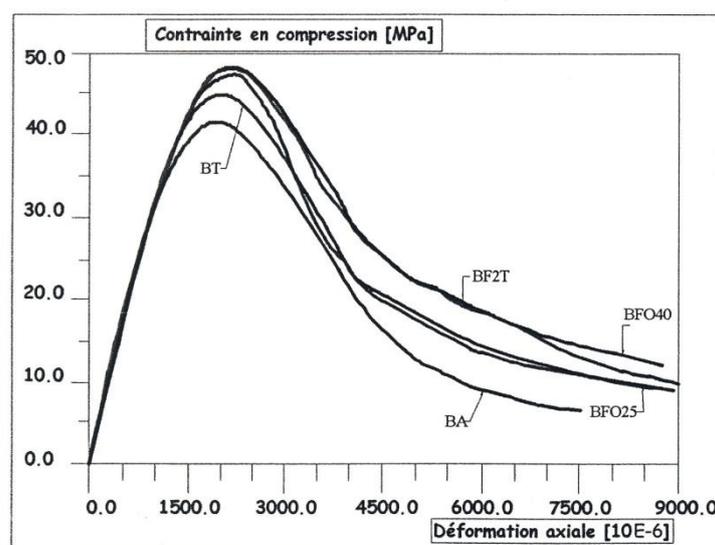


Figure I.9: Courbe contrainte déformation des essais de compression faits sur des éprouvettes asservies.

Dans le but d'affûter les résultats, des essais de compression ont été réalisés au LCPC, en prélevant par sciage, des éprouvettes de dimensions 20x20x50 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 est admis que l'ajout de fibres n'améliore en rien la résistance d'un béton à la compression comparé à celui de référence [2]. Pis, on observe une diminution du module de Young ainsi que la contrainte au pic. 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 I-11 [13].

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 [13].

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 [13].

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 transversales.

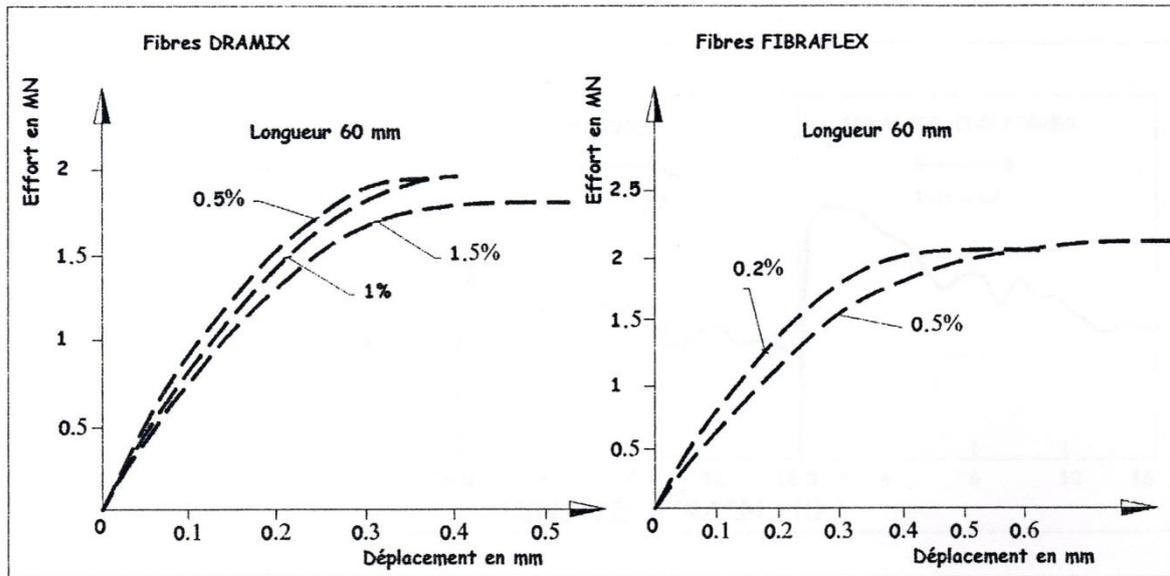


Figure I.10: Diagrammes effort-déplacement en compression en fonction du type et du pourcentage en fibres [13].

I.4.3. Essais de traction par Flexion

Le béton testé au cours de cette étude [14] est renforcé de fibres de dramix et les fibres en copeaux de longueur 50 mm et 30 mm. Les corps d'éprouvettes sont de forme prismatique de dimensions 100x100x400 mm, ils sont soumis à l'essai 28 jours après le coulage. Ils reposent sur deux appuis distants de 300 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.

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 I.11.

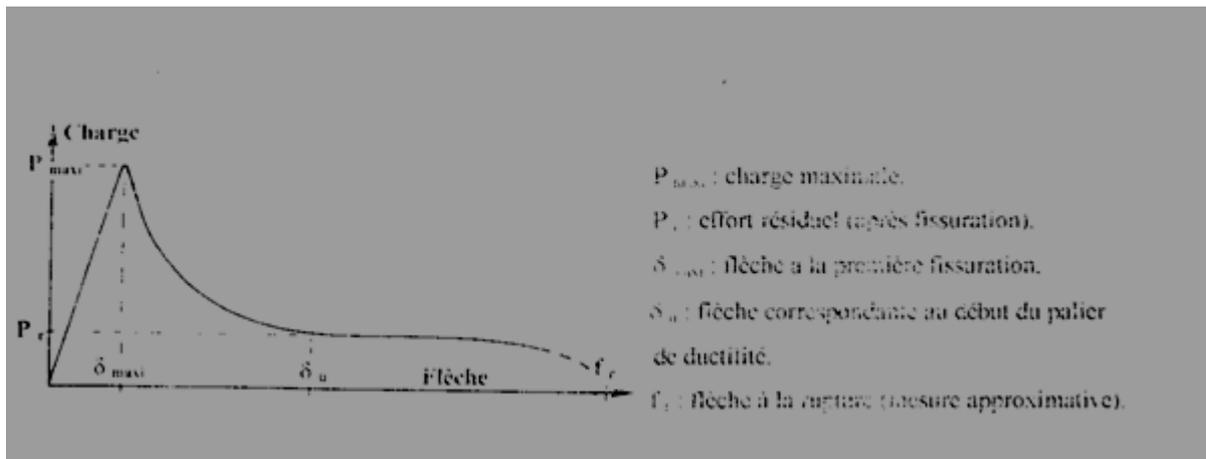


Figure I.11: Allure des courbes charge-flèche.

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 [14].



Figure I.12: Vue du dispositif d'essai (machine Tribel OPM)

I.4.3.1. Influence du type de fibres

Le comportement global des éprouvettes de deux types de béton (béton armé de fibres Dramix 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.

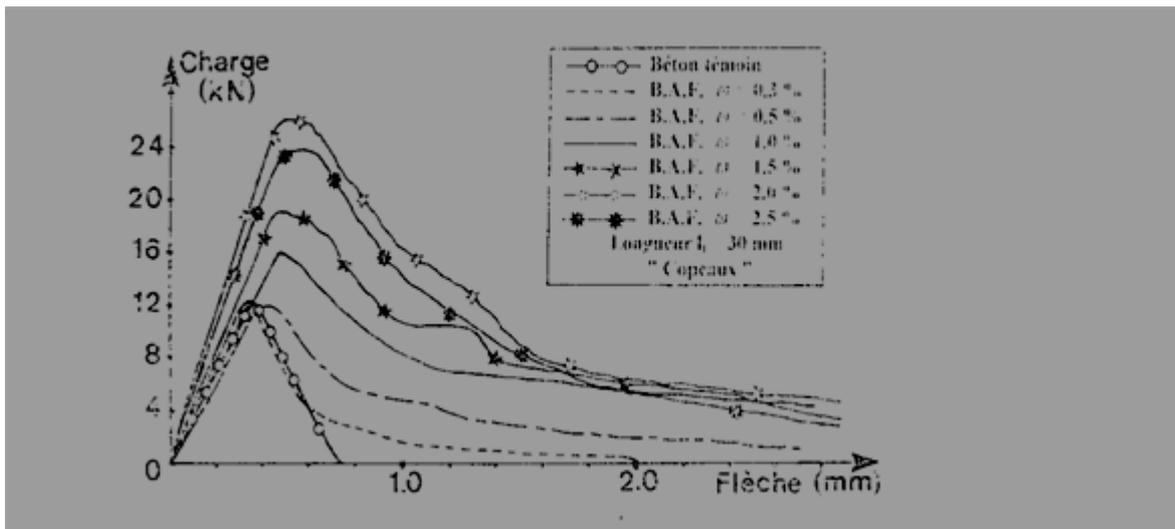
Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $l_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure[14].

I.4.3.2. Influence de la longueur des fibres

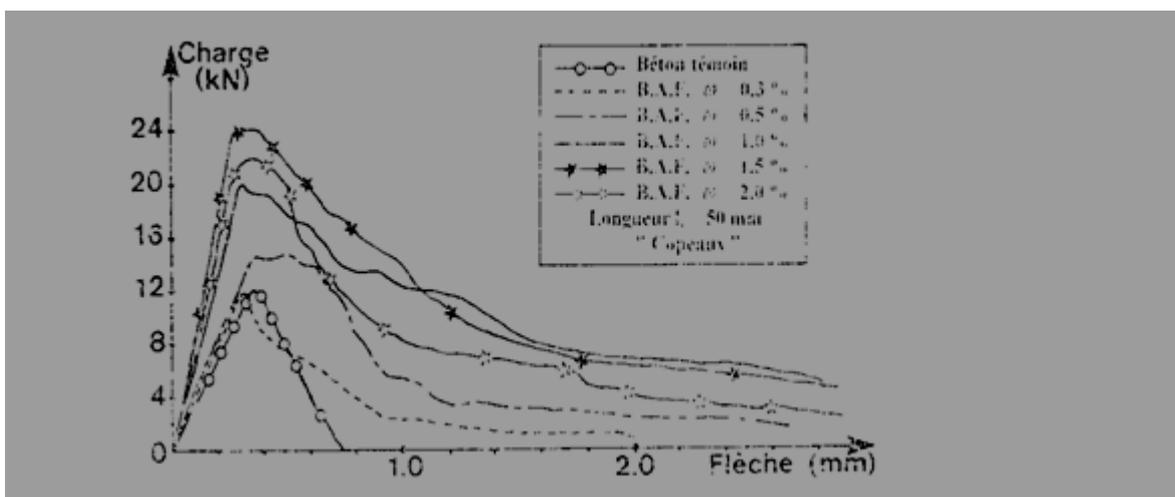
Avec le béton de fibres en copeaux, pour des pourcentages 0,3; 0.5 ; 1 ; 1,5 ; 2 et 2,5%, et des longueurs de 30 et 50 mm, on peut conclure que pour les faibles pourcentages, la longueur n'affecte que très peu le comportement des éprouvettes en traction. Par contre, plus le pourcentage augmente, plus l'effet de la longueur des fibres 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.

I.4.3.3. 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 béton témoin (sans fibres). Il apparait que les fibres apportent une ductilité au 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[12].



$l_f = 30$ mm



$l_f = 50$ mm

Figure I.13: Influence de la longueur des fibres sur la résistance à la traction par flexion

CONCLUSION

L'introduction des fibres dans une matrice béton amène une certaine ductilité au comportement mécanique du matériau, cet ajout retarde la microfissuration et permet de retenir les "morceaux" en cas de rupture accidentelle. Il a été mis en évidence une légère augmentation de la résistance à la compression et aussi à la flexion. Cependant, il y a certaines précautions à prendre quant à la mise en oeuvre de ce matériau, puisque les fibres modifient la maniabilité. Les pourcentages maximums de fibres incorporées restent limités compte tenu des problèmes liés à la mise en oeuvre (formation d'oursins et pelotes donc création de porosité au sein de la matrice). Dans la seconde partie de ce travail, on s'intéresse à la maniabilité du béton armé de fibres métalliques. Les fibres utilisées proviennent des déchets d'usinage des pièces mécaniques en acier et leur utilisation constitue une manière de recycler ces déchets. Des essais mécaniques (traction directe et compression) sont aussi effectués.

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. INTRODUCTION

Dans la présente étude, nous nous intéressons à l'utilisation des fibres «locales» pour le renforcement du béton. Ces fibres proviennent des déchets d'usinage des pièces en acier sous forme de copeaux. Dans la première partie de ce travail, des essais au maniabilimètre du LCPC ont été effectués pour étudier l'ouvrabilité du béton renforcé de ces fibres. Après confection des éprouvettes en faisant varier le pourcentage de fibres (0,2 ; 0,4 ; 0,6 et 0,8%) et en modifiant le rapport S/G (0,64 ; 0,8 ; 1 et 1,4) des essais mécaniques (compression et traction directe) ont été réalisés sur ces même éprouvettes 28 jours après leur confection. Pour chaque pourcentage de fibres, nous avons réalisé quatre gâchés avec des compositions de béton variables en modifiant le rapport S/G, et pour chaque gâché nous avons confectionné trois éprouvettes pour réaliser les essais.

II.2. ETUDE DE LA COMPOSITION DU BETON

II.2.1. INTRODUCTION

Les bétons sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, de l'eau, du sable, des granulats et des adjuvants (retardateurs ou accélérateurs de prise, réducteurs d'eau...etc.). Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature, les pourcentages des constituants, le malaxage et la mise en oeuvre.

Le béton est constitué de:

- liant (ciment ou chaux),
- eau,
- sable,
- granulats,
- adjuvants.

II.2.1.1. Les liants

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement à l'air. C'est le constituant fondamental du béton puisque c'est lui qui joue le rôle de cohésion des différents constituants.

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc),
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner,
- les chaux hydrauliques naturelles.

Le ciment utilisé pour la préparation du béton est de type CPJ-CEMII/B dans la classe 42,5.

II.2.1.2. Les sables

Les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
 - sable de laitier;
 - sable d'oxydes de fer, de chromite;
 - sable de briques concassées.

Certains sables sont à éviter, notamment les sables très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisé pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm.

Le sable que nous avons utilisé pour notre béton provient de l'Oued Sébaou de Tizi-Ouzou de diamètre maximum de 0,3 mm.

II.2.1.3. Les granulats

Les granulats doivent avoir une bonne granulométrie dans le diamètre varie de plus petit au plus gros.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ...), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.

Les granulats peuvent se classer selon les diamètres:

- petits: de 3 à 8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- moyens: de 8 à 15 mm;
- gros: de 15 à 25 mm;
- très gros: de 25 à 40 mm.

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures roulées et proviennent de l'Oued Sébaou de Tizi-ouzou. Leur diamètre varie de 3 à 20 mm.

II.2.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faible quantité. Ils améliorent les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés. Les principaux adjuvants sont :

- les plastifiants (améliorent la maniabilité et sont réducteurs d'eau),
- les entraîneurs d'air (permettent la formation des micros bulle d'air dans le béton durci)
- les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs),
- les hydrofuges.

Le plastifiant que nous avons utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau appelé MEDAFLOW 30. Il est conçu à base de poly carboxylates qui améliorent considérablement les propriétés du béton. Ce plastifiant ne présente pas d'effet retardataire.

II.2.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable, graviers) en produisant un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistance mécanique, faible retrait, bonne durabilité...).

Pour définir ces proportions, on doit passer tout d'abord à l'essai de l'analyse granulométrique puis choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel...etc.

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions.

II.2.2.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs catégories de grains décroissantes.

II.2.2.2. Équipements utilisés

Pour réaliser cette opération, nous avons utilisé les équipements suivants :

- des tamis de différents diamètres,
- un échantillon de 3000 g pour chaque matériau,
- une balance de 5 kg, pesant au gramme près,
- une étuve thermostatée,
- un vibro- tamis électrique.

II.2.2.3. Description de l'essai

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme roulée et leur diamètre est de 0/3, 3/8 et 8/15. Une fois ces matériaux lavés, ils seront ensuite séchés pendant 72 heures à l'étuve à une température maximale de 105 °C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose d'un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de

la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas. Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 , la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulé R_n , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux suivants:

Tableau II.1: Analyse granulométrique du sable

Dimension des tamis (en mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5	11,4	11,4	0,76	99,24
2,5	129,8	141,2	9,41	90,59
1,25	445,1	586,3	39,08	60,92
0,63	350,0	936,3	62,42	37,58
0,315	353,0	1289,3	85,95	14,05
0,16	157,3	1446,6	96,44	3,56
0,08	14,2	1460,8	97,39	2,61
Fond	38,6	1499,4	99,96	0,04

Tableau II.2: Analyse granulométrique pour le gravier (3/8)

Dimension des tamis en (mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
10	149,7	149,7	4,99	95,01
8	597,2	746,9	27,90	75,10
6,3	881,3	1628,2	54,27	45,73
5	793,4	2421,6	80,72	19,28
4	265,1	2686,7	89,56	10,44
3,15	222,8	2909,5	96,98	3,02
2,5	21,8	2931,3	97,71	2,29
Fond	68,3	2999,6	99,99	0,03

Tableau II.3: Analyse granulométrique pour le gravier (8/15)

Dimension des tamis en (mm)	Refus (en g)	Refus cumulés (en g)	Refus cumulés (%)	Tamises cumulés (%)
20	0	0	0	100
16	113,2	113,2	3,77	96,23
12,5	711,7	824,9	27,50	72,50
10	696,1	1521	50,70	49,30
8	611,8	2132,8	71,09	28,91
6,3	525,4	2658,2	88,61	11,39
5	231,7	2889,9	96,33	3,67
Fond	110,1	3000	100	0

Les valeurs données sur les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure II.1.

II.2.2.4. Module de finesse

C'est le centième de la somme des refus (exprimé en pourcentage de poids) aux tamis de 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm.

Le module de finesse est particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante.

$$M. F \text{ d'un sable} = \text{refus sur les tamis} = \frac{0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5, 5 \text{ mm}}{100}$$

$$M. F = \frac{96,44 + 85,95 + 62,42 + 39,08 + 9,41 + 0,76}{100} = 2,94$$

On peut noter que c'est un sable grossier qui correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistances élevées.

II.2.3. COMPOSITION DE BETON PAR LA METHODE DE DREUX-GORISSE

Cette méthode a été retenue pour sa simplicité à déterminer les différents composants du béton [15].

II.2.3.1. Résistance visée

Par sécurité, la résistance visée doit être majorée de 15% par rapport à la résistance que l'on souhaite obtenir. Ainsi, la résistance visée doit être obtenue comme suit :

$$\sigma'_{28j} = \sigma_{28j} + 0,15\sigma_{28j} \text{ Soit: } \sigma'_{28j} = 1,15\sigma_{28j}$$

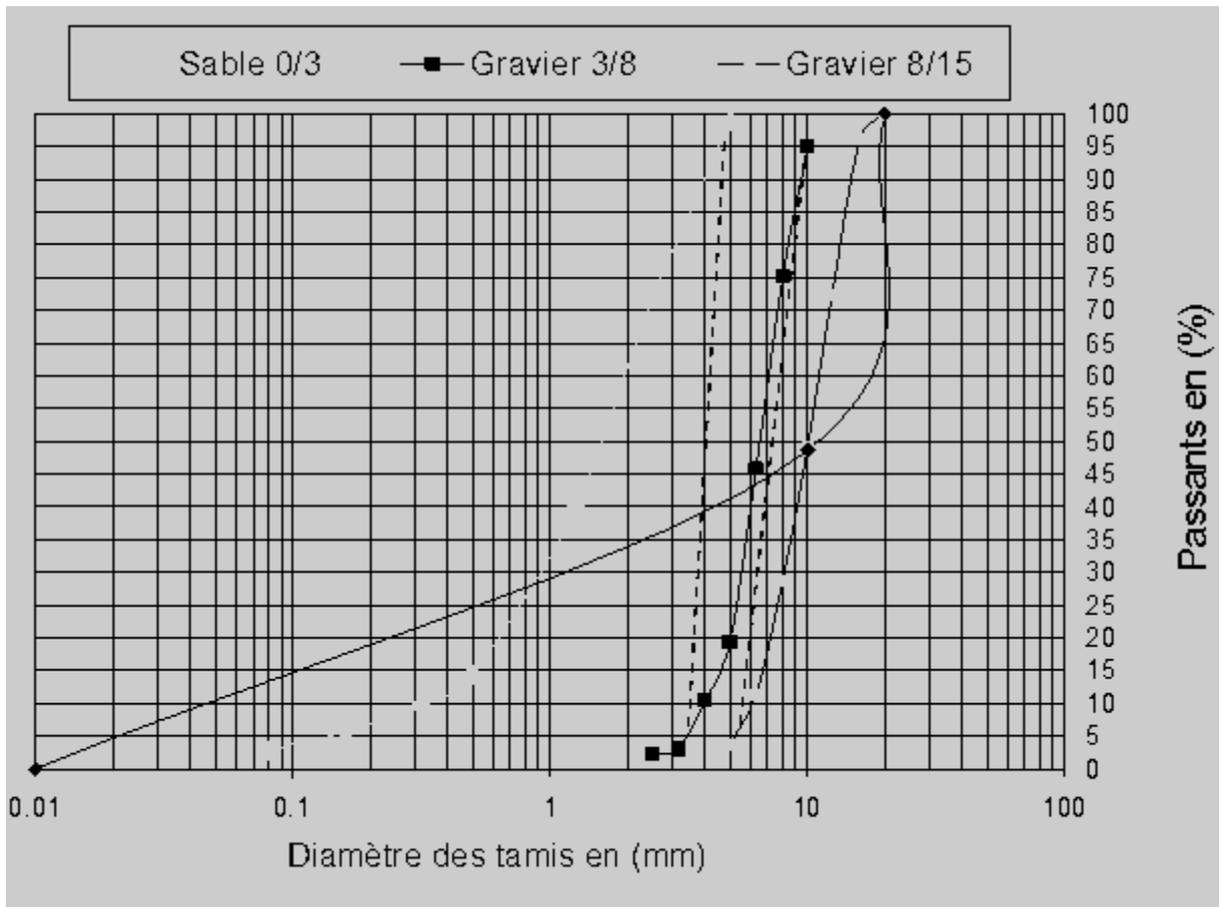


Figure II-1 Courbe Granulométrique

La résistance désirée pour un béton témoin à 28 jours est telle que : $\sigma_{28j} = 25MPa$

La résistance visée est telle que : $\sigma'_{28} = 1.15\sigma_{28}$, soit : $\sigma'_{28} = 1.15 \times 25 = 28.75MPa$

II.2.3.2. Dosage en ciment et eau

La formule ci-dessous permet le calcul de la résistance à la compression visée à 28

jours, soit : $f'_c = G.F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$

$$\text{Avec : } \frac{C}{E} = \frac{f'_c}{G.F_{CE}} + 0.5$$

$f'_c = \sigma'_{28}$ résistance visée à 28 jours.

S_c : classe vraie de ciment en MPa.

G : coefficient granulaire.

C : dosage en ciment (Kg de ciment/m³ de béton).

E : dosage en eau potable (Kg d'eau/m³ de béton ou litre d'eau/m³ de béton).

- Choix approprié du coefficient granulaire G :

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau ci-après établi par George DREUX [15].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 16mm	25 ≤ D ≤ 40mm	D ≥ 63mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau II.4: Valeurs approximatives du coefficient granulaire

Les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 16 mm, ce qui donne un coefficient granulaire $G=0,45$, avec une bonne qualité.

- Choix de la classe vraie de ciment

Parmi la liste des ciments disponibles sur le marché des matériaux de construction, nous avons retenu le ciment CEM CPJII42.5. Sa classe vraie est estimée à 47,5 MPa.

Le rapport C/E est donné par : $\frac{C}{E} = \frac{28.75}{0.45 \times 47.5} + 0.5 = 1.84$

- Dosage en ciment par m³ de béton :

Connaissant le rapport $\frac{C}{E}$ et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A , on en

déduit, grâce à l'abaque, $\frac{C}{E}$ en fonction de A , le dosage en ciment C correspondant:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 1.84 \\ A = 8 \text{ cm} \end{array} \right\} \rightarrow \text{l'abaque donne la valeur du dosage en ciment : } C = 380 \text{ Kg (voir Fig. II.2).}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{C}{E} = 1.84 \\ C = 380 \end{array} \right\} \rightarrow \text{on en déduit la valeur de } E \text{ qui est : } E = 206.52 \text{ Kg}$$

- Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur le même graphe d'analyse granulométrique, Type AFNOR (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis) déjà obtenu (voir fig. II.1), on trace une composition granulaire de référence OAB avec :

le point O est repéré par ses coordonnées: [0,080; 0]

le point B est repéré par ses coordonnées: [D; 100], (D: le diamètre du plus gros granulat).

Le point de brisure A a les coordonnées suivantes:

en abscisse :

- si $D \leq 20\text{mm}$, l'abscisse est de $D/2$,

- si $D > 20\text{mm}$, l'abscisse est située au milieu limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D. Le plus gros granulat est $D=16\text{mm}$, donc le point de brisure a pour abscisse: $D/2=8\text{mm}$.

en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K \quad \text{K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et le module de finesse de sable.}$$

Comme le module de finesse M_f du sable vaut 2,94, celui-ci est classé comme un sable grossier, la valeur du coefficient de correction K sera calculée par la formule suivante :

$$K = 6Mf - 15 \text{ Soit } K = 2.64$$

$$d'où, Y = 50 - \sqrt{16} + 2.94 = 48.64$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont: (8 ; 49).

- La ligne de partage

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire du plus petit granulats au point d'ordonnée 5%, de la courbe granulaire du plus gros granulats. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et gravier. Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamis correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion de gravier.

On obtient donc un mélange optimal avec un volume absolu de 38,5 % de sable 0/3 et 71,5% de gravier (Gravier 3/8: 6,5 % + Gravier 8/5: 55 %). Sur la courbe granulométrie, les points d'intersection entre les lignes de partage et la courbe OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

Sable 0/3 : 38,5 %

Gravier 3/8 : 6,5 %

Gravier 8/15 : 55 %

- Coefficient de compacité

Il est défini comme le rapport des volumes absolus en litres des matières solides :

$$V_M = V_S + V_G + V_C$$

au volume total du béton frais soit un mètre cube :

$$\gamma = \frac{V_M}{1000}$$

En utilisant le tableau des valeurs du coefficient de compacité [15] et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 16 mm, on trouve une valeur de $\gamma = 0,8146$.

Nous avons retenu une valeur de γ telle que $\gamma = 0,81$.

II.2.3.3. Dosage des Granulats

Les dosages en volume de chacun constituant du béton sont donnés par les relations ci-dessous:

- Volume absolu du ciment : $V_C = \frac{m_C}{\gamma} = \frac{380}{3.1} = 122,58$ litres

Avec m_C : dosage (en masse) de ciment

$\gamma = 3,1$ g/ml: masse volumique

- Volume absolu des granulats (l'ensemble):

$$V_G = 1000\gamma - V_C = 1000 \times 0.81 - 122.58 = 687.42 \text{ litre}$$

- Volume absolu du sable: $V_S = \frac{V_G \times 38.5}{100} = \frac{687.42 \times 38.5}{100} = 264.66 \text{ litre}$

- Volume absolu du gravier 3/8: $V_{G3/8} = \frac{V_G \times 6.5}{100} = \frac{687.42 \times 6.5}{100} = 44.68 \text{ litre}$

- Volume absolu du gravier 8/15: $V_{G8/15} = \frac{V_G \times 55}{100} = \frac{687.42 \times 55}{100} = 378.08 \text{ litre}$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1 m³ de béton sont donnés par:

- Masse de sable : $M_S = V_S \times \gamma_S = 264.66 \times 2.65 = 701.35 \text{ kg}$

- Masse de graviers 3/8: $M_{G3/8} = V_{G3/8} \times \gamma_{G3/8} = 44.68 \times 2.61 = 116.61 \text{ kg}$

- Masse de graviers 8/15: $M_{8/15} = V_{G8/15} \times \gamma_{G8/15} = 378.08 \times 2.58 = 975.45 \text{ kg}$

Pour préparer 1 m³ de béton, il faudra donc les masses suivantes :

Constituants	Masse (Kg)
Sable 0/3	701,35
Gravier 3/8	116,61
Gravier 8/15	975,45
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C)	380
Eau (E)	206,52

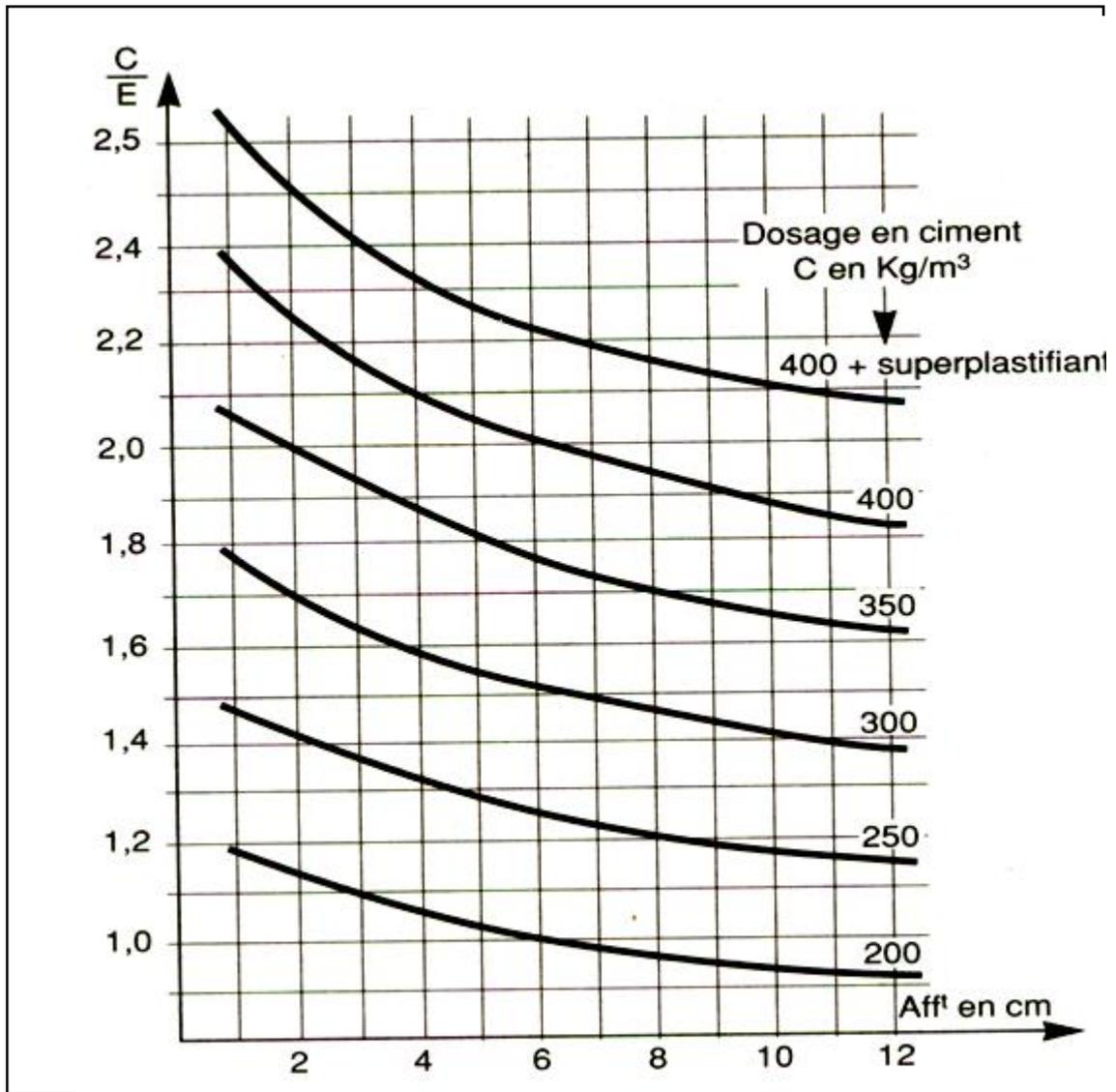


Figure II.2: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C /E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)

II.2.3.4. Fibres utilisées

Les fibres utilisées, pour préparer le béton qui a servi à confectionner les éprouvettes, sont des fibres métalliques provenant de la récupération des déchets d'usinage de pièces en acier de la société S.N.V.I de Rouïba. Ces fibres sont sous forme de copeaux de forme géométrique ondulée. Elles ont été étirées puis coupées en fibres de 05cm de longueur avec 08 ondulations au laboratoire de Génie Civil de l'université de Tizi-Ouzou (figures II.3,4 et II.5). Ces fibres ont des crochets à leurs extrémités favorisant ainsi leur ancrage dans la masse de béton.

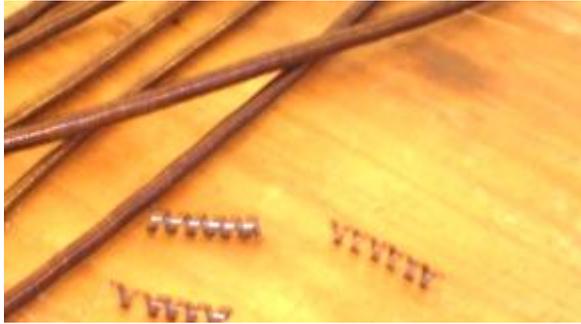


Figure II.3: Fibres en copeaux



Figure II.4: Etirage de fibres

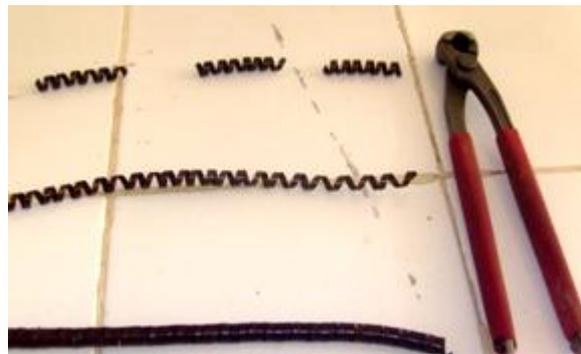


Figure II.5: Fibres coupées

Les caractéristiques des fibres sont données dans le tableau II.5:

Type de fibre	Masse volumique γ (kg/m ³)	Résistance à la traction (MPa)
Copeaux	7860	70

Tableau II.5: Caractéristiques des fibres

Les valeurs de la masse volumique et de la résistance à la traction ont été déterminées au laboratoire.

Pour la masse volumique, on écrit :
$$\gamma = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Avec :

M : masse d'une quantité de fibres (g).

V_2 : volume d'eau après l'ajout de fibre dans le tube (ml).

V_1 ; volume d'eau initial (ml).

Pour sa résistance à la traction, la fibre a été soumise à l'essai de traction avec une presse hydraulique de marque Ibertest.

II.3. OPTIMISATION DU BETON DE FIBRES

Si l'on regarde la littérature concernant les méthodes de composition des bétons renforcés de fibres métalliques (B.R.F.M.) [15], on constate que ces méthodes, pour la plupart empiriques, sont basées essentiellement sur un grand nombre d'études expérimentales et aboutissent à des recommandations qui ne sont pas adaptées à toutes les utilisations que l'on fait des B.R.F.M. et ne permettant pas de tirer le meilleur parti de ce composite.

Suivant l'application industrielle envisagée, la composition du B.R.F.M. doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé. Ainsi, suivant que l'on désire obtenir un B.R.F.M. très maniable, très résistant ou encore ayant une influence sur la ductilité des structures, la composition du matériau composite sera complètement différente.

Ainsi pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques le LCPC propose une méthode expérimentale basée sur la méthode Baron-Lesage, déjà utilisée pour les bétons courants [15].

La méthode de Baron-Lesage est basée sur deux hypothèses :

- pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C, fixé),
- le dosage optimal en granulats

Afin que cette méthode soit applicable au béton de fibres métalliques on est amené à introduire une troisième hypothèse :

- l'ajout de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

Dans la pratique, nous procédons en 3 étapes pour composer le B.R.F.M :

- nous nous fixons au départ le rapport eau sur ciment (E/C) ainsi le pourcentage de fibres à incorporer.
- nous faisons varier le rapport S/G (sable sur granulats) et nous déterminons pour chaque rapport la maniabilité du béton de fibres. Nous pouvons ainsi tracer une courbe reliant la maniabilité et le rapport S/G et ensuite déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est la plus grande. Si on se réfère à la première hypothèse, on considère que le rapport S/G est optimal (figure II.6).

Temps d'écoulement

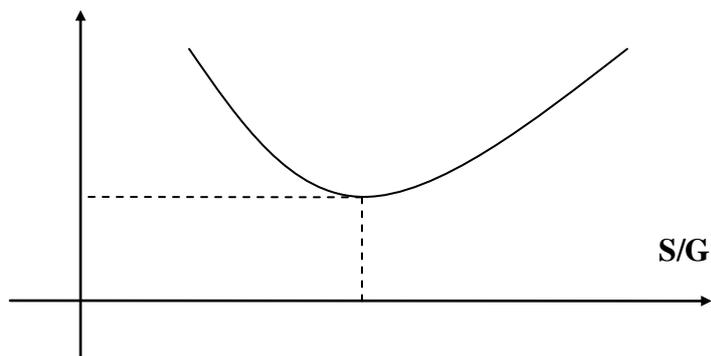


Figure II.6: Détermination du rapport S/G optimal

Avec la méthode de Barron-Lesage, nous avons constitué quatre compositions de béton de rapports S/G différents à base de la composition initialement déterminée (S/G=0.64, S/G=0.8 ; S/G=1 et S/G=1.4) avec un rapport E/C fixe égal à 0,543 (voir tableau II.6).

Constituants de béton pour un volume 1 m ³	S/G =0.64	S/G=0.8	S/G=1	S/G=1.4
Sable 0/3 (en kg)	701,35	797	896,67	1044,66
Gravier 3/8 (en kg)	116,61	106,33	95,67	79,33
Gravier 8/15 (en kg)	975,45	890	801	666,66
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C en kg)	380	380	380	380
Eau (E en kg)	206,52	206,52	206,52	206,52
Fluidifiant (0.05% du poids de ciment en g)	190	190	190	190

Tableau II.6: Masse des différents constituants pour 1 m³ de béton.

Une fois obtenue la masse volumique des fibres (ω), on détermine le poids des différents pourcentages pour 1 m³ de béton qui est présenté dans le tableau II.7.

Tableau II.7: Masse des fibres dans 1 m³ de béton, pour différents pourcentages.

Pourcentages en volume des fibres	0,2 %	0,4 %	0,6 %	0,8 %
Masse (kg)	15,7	31,5	47,2	62,9

II.4. MESURES ET CONROLES DE L'OUVRABILITE (MANIABILITE) DU BETON DE FIBRES

II.4.1. Méthode d'évaluation de l'ouvrabilité du béton de fibres

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage. La mesure de l'ouvrabilité de béton conventionné peut être faite soit avec des méthodes à base d'écoulement statique comme le cône d'Abrams ou par des méthodes à base d'écoulement dynamique comme la méthode de maniabilimètre du LCPC, table à secousses,...etc.

D'après les chercheurs, SERNA-ROS et PAILLERE [15] la mesure de l'affaissement pour le B.R.F.M au cône d'Abrams présente deux inconvénients :

- le cône d'Abrams est qualifié d'essai "statique" puisqu'il met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous l'effet de la pesanteur. Or avec des B.R.F.M., il est très difficile d'observer des affaissements significatifs, ce qui rend tout à fait imprécise la détermination du rapport sable/gravillon optimal.
- le second inconvénient concerne le volume réduit du béton testé lors des mesures au cône d'Abrams. En effet les 6 litres de contenance du cône nous paraissent insuffisants pour être représentatifs du comportement rhéologique du B.R.F.M frais, surtout lorsque les fibres incorporées font 50 à 60 mm de longueur.

Dans notre étude, nous avons utilisé le maniabilimètre L.C.L conçu au laboratoire central des ponts et chaussées L.C.P.C.

Cet appareil permet de caractériser la maniabilité du béton par un temps d'écoulement du matériau soumis à une vibration extérieure. Ce maniabilimètre qui permet de tester 30 litres de béton (soit 5 fois plus que le cône d'Abrams) constitue donc un essai "dynamique" qui est plus représentatif du comportement rhéologique du B.R.F.M. frais.

II.4.2. Description de l'appareil maniabilimètre du LCPC

Il est constitué par des plaques d'acier formant un parallépipède rectangle de dimensions: 30x30x60 centimètres, une plaque inclinée de 38°(figure II.7) par rapport à la

verticale qui divise le moule en deux compartiments de volumes différents, trois traits horizontaux sont gravés à l'intérieur du moule sur la plaque d'extrémité et un vibreur.

Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

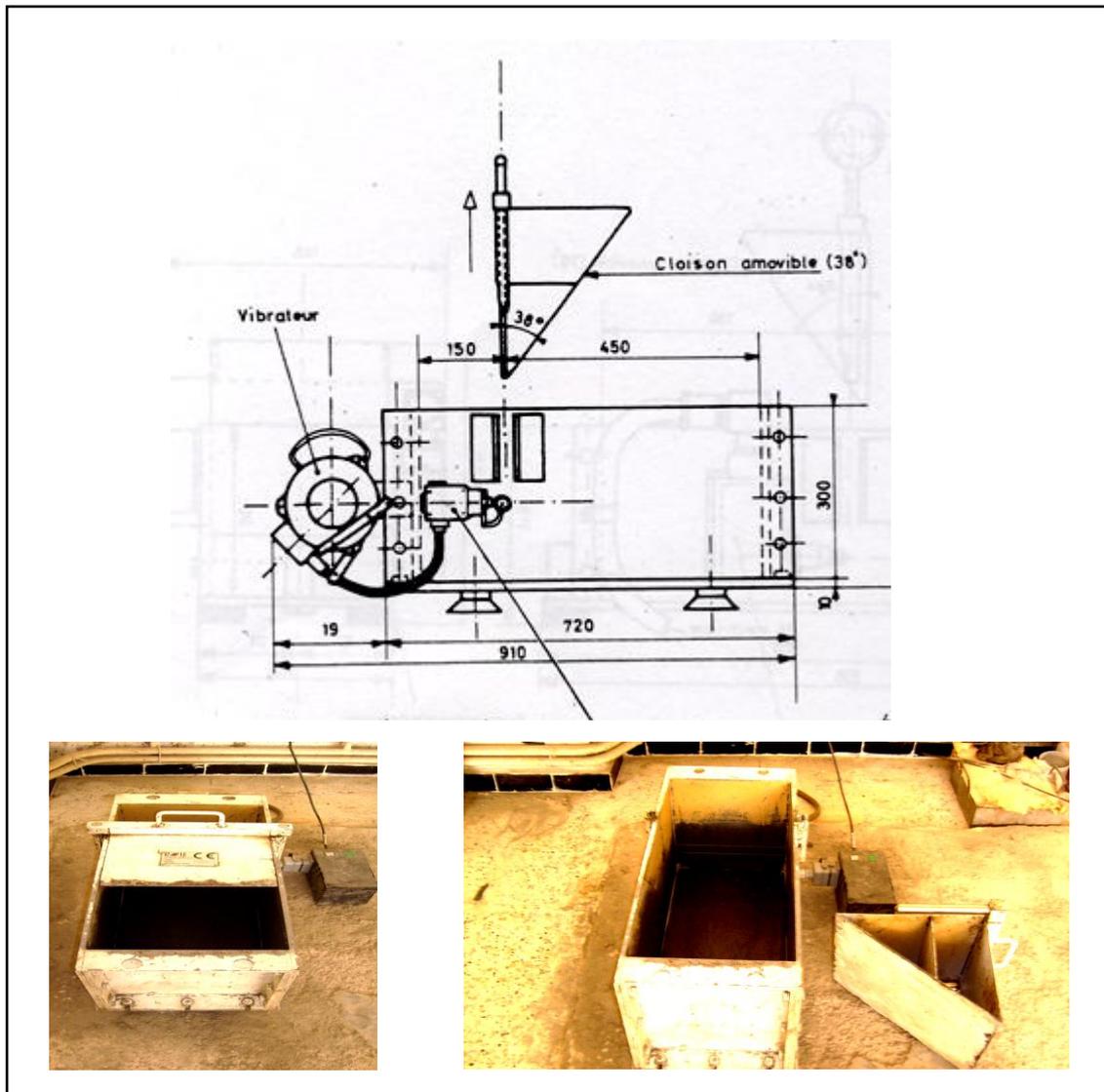


Figure II.7: Le Maniabilimètre du LCPC

II.4.3. Préparation et Mesure de l'ouvrabilité du béton de fibres

Dans notre étude, nous avons utilisé le maniabilimètre du LCPC. Pour la préparation du béton, nous avons utilisé la méthode de Baron-Lesage citée précédemment, basée sur la fixation du rapport E/C (Eau/Ciment) et la variation du rapport S/G (Sable/Graviers) à partir de la composition du béton témoin.

Pour étudier la maniabilité du béton de fibres, nous avons réalisé pour chaque pourcentage de fibres ω (0,2% ; 0,4% ; 0,6% et 0,8%), quatre gâchés du béton avec un rapport S/G différent (S/G = 0,64 ; S/G = 0,8 ; S/G = 1 et S/G = 1,4) et un rapport E /C constant fixé à 0,54.

Ce maniabilimètre permet de tester 30 litres de béton (soit 5 fois plus que le cône d'Abrams). Les masses des différents constituants, pour le volume de 30 litres de béton, sont données dans le tableau II-8.

Tableau II.8: Masses des différents constituants pour une gâché de 1 m³ de béton

Constituants de béton pour un volume de 1 m ³	S/G=0,64	S/G=0,8	S/G = 1	S/G =1,4
Sable 0/3 (kg)	21,04	23,91	26,9	31,34
Gravier 3/8 (kg)	3,50	3,19	2,87	2,38
Gravier 8/15 (kg)	29,26	26,70	24,03	20
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C) (kg)	11,40	11,40	11,40	11,40
Eau (E) (kg)	6,20	6,20	6,20	6,20
Fluidifiant (0.05% du poids de ciment en g)	5,7	5,7	5,7	5,7

La masse des fibres pour chaque pourcentage ajouté à une gâché de 30 litres de béton, est donnée dans le tableau II,9.

Tableau II.9: Masse des fibres pour différents pourcentages.

Pourcentages en volume des fibres (ω)	0,2 %	0,4 %	0,6 %	0,8 %
Masse (kg)	0,477	0,944	1,416	1,887

Le principe de l'essai consiste, une fois le béton versé dans le premier compartiment, à introduire manuellement les fibres de manière homogène, puis à enlever la cloison de séparation. Le vibreur se met en marche et simultanément on déclenche le chronomètre. Une fois que le béton frais, qui s'écoule dans le deuxième compartiment, ait atteint le repère fixe gravé dans la plaque extrême (figures II.8 et II.9), on arrête l'essai et on mesure le temps écoulé.



Figure II.8: Remplissage du béton de fibres dans le maniabilimètre.

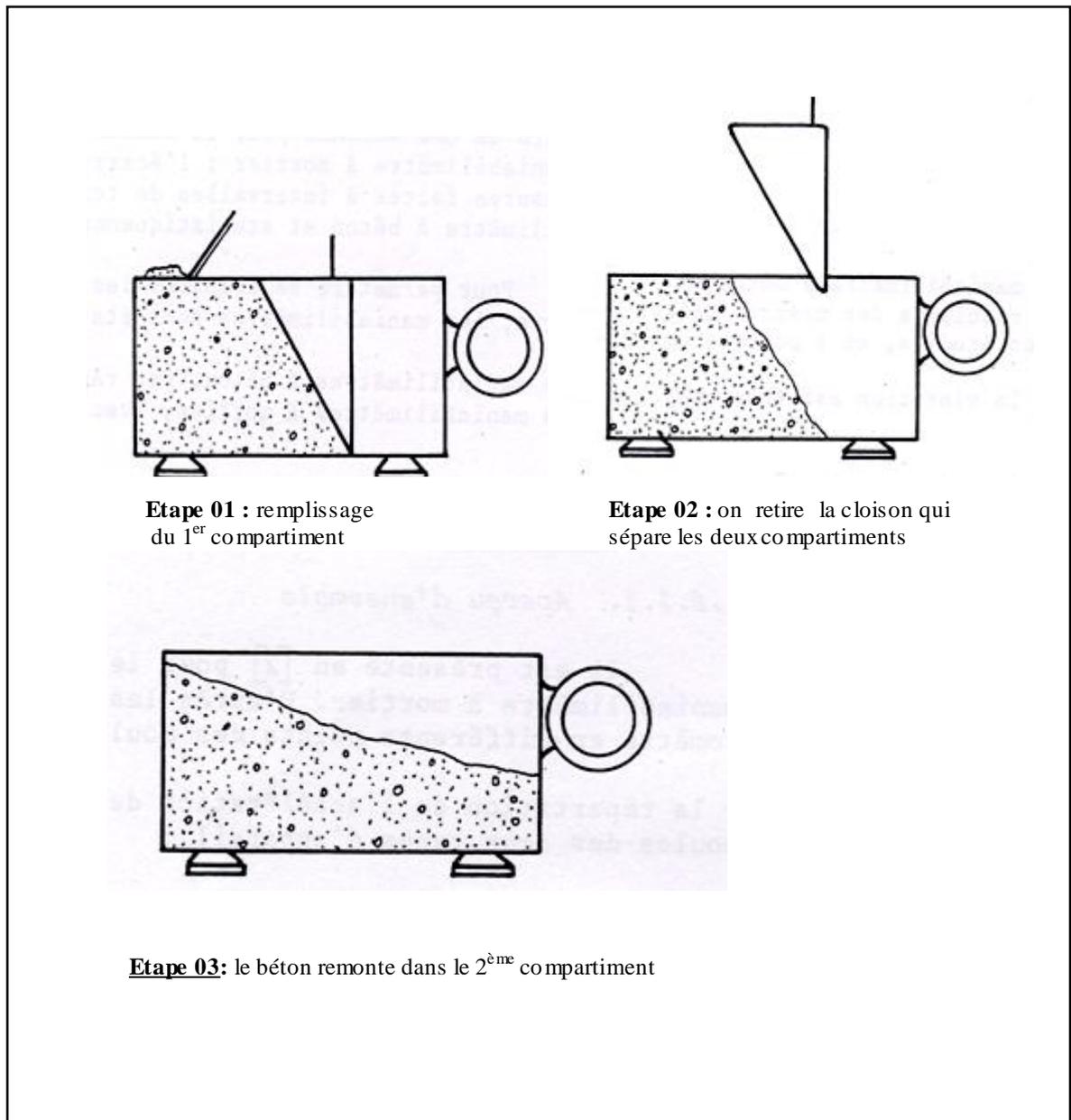


Figure II.9: Phases successives de l'essai de maniabilité

Une fois l'essai de maniabilité terminé, on trace une courbe reliant la maniabilité caractérisée par le temps d'écoulement « t » et le rapport S/G (sable/graviers).

Dans le tableau II.10, on reprend les valeurs du temps d'écoulement de béton de fibres obtenues pour chaque valeur du rapport S/G (pour chaque composition du béton la quantité de plastifiant ajoutée au mélange est de 0,05 % du poids de ciment, soit 5,7 g), puis on trace la courbe temps d'écoulement S/G (voir figures II.10, 11, 12 et 13).

% de fibre (ω)	S/G	Temps d'écoulement(s)
0,2 %	0,64	11,5
	0,8	10,5
	1	12,5
	1,4	-
0,4 %	0,64	-
	0,8	12,6
	1	11,8
	1,4	16,8
0,6 %	0,64	19
	0,8	15,7
	1	12,7
	1,4	17
0,8 %	0,64	15,49
	0,8	14,32
	1	14
	1,4	16,42

Tableau II.10: Temps d'écoulement obtenu pour chaque valeur du rapport S/G avec une quantité de fluidifiant égale à 0,05% du poids de ciment.

Nous avons refait l'essai de maniabilité pour le pourcentage de fibres 0,8 % en augmentant la quantité de plastifiant soit de 0,2 % du poids de ciment (22,8 g) et le temps d'écoulement obtenu pour différentes valeurs du rapport S/G est indiqué dans le tableau ci-dessous.

% de fibre (ω)	S/G	Temps d'écoulement (s)
0,8 %	0,64	12,4
	0,8	11,4
	1	10,45
	1,4	13,1

Tableau II.11: Temps d'écoulement obtenu pour chaque valeur du rapport S/G avec la quantité de fluidifiant égale à 0.2% du poids de ciment avec $\omega = 0,8\%$

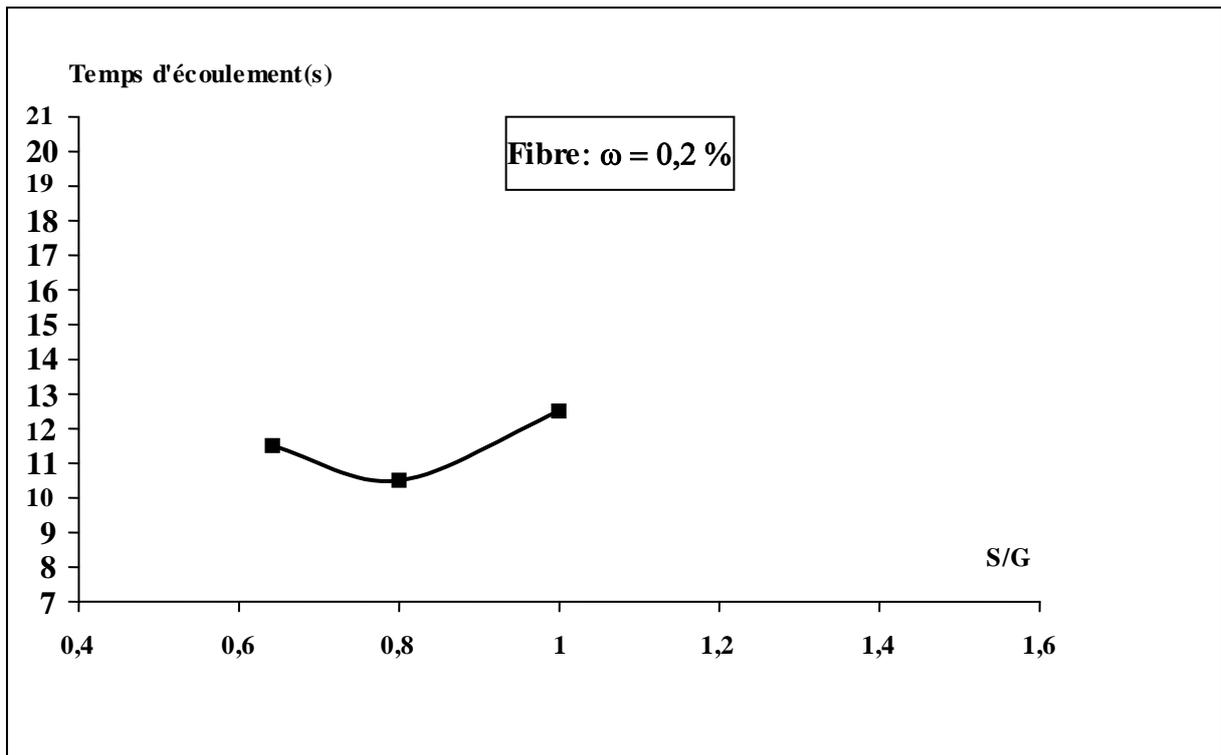


Figure II.10: Temps d'écoulement en fonction du rapport S/G pour $\omega=0,2\%$.

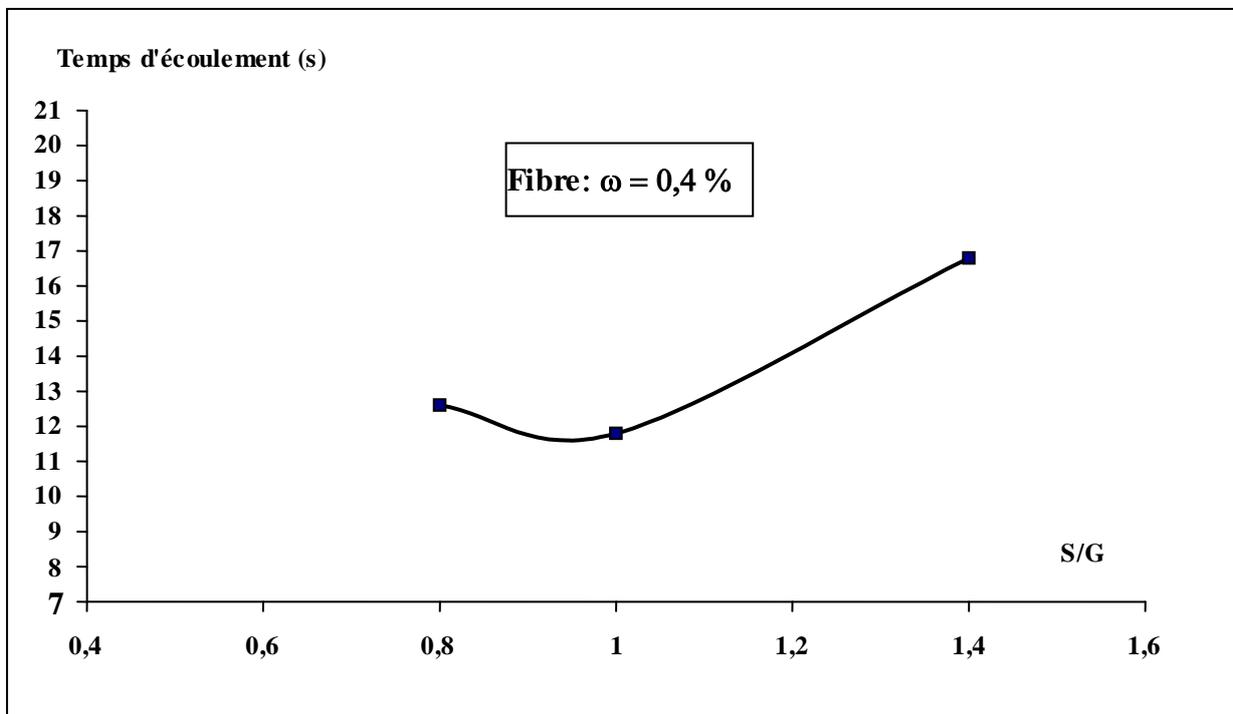


Figure II.11: Temps d'écoulement en fonction du rapport S/G pour $\omega=0,4\%$

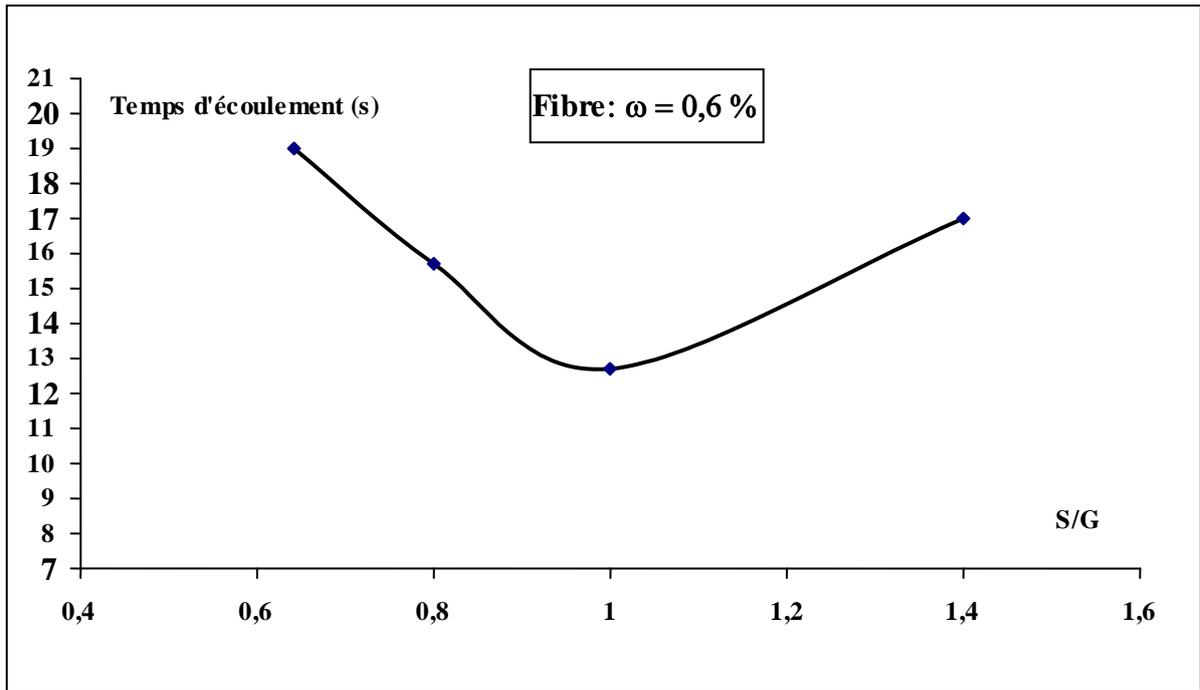


Figure II-12: Temps d'écoulement en fonction du rapport S/G pour $\omega = 0,6\%$

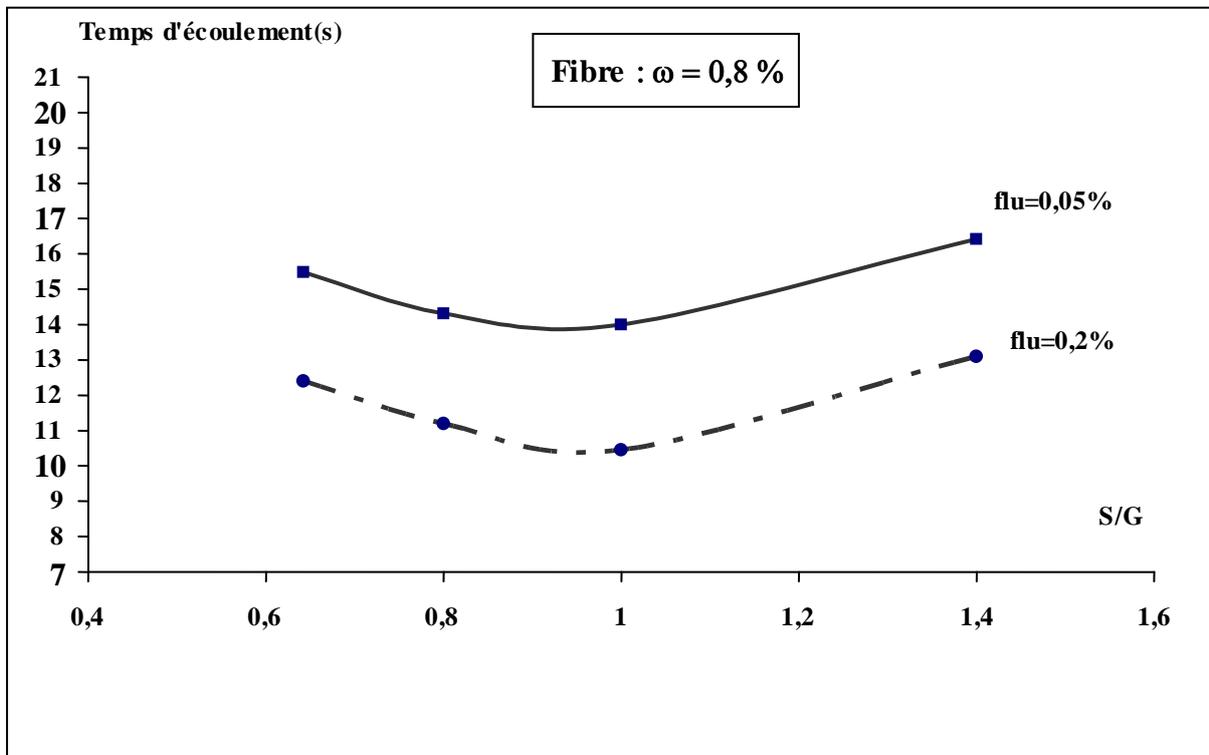


Figure II-13: Temps d'écoulement en fonction du rapport S/G pour $\omega = 0,8\%$

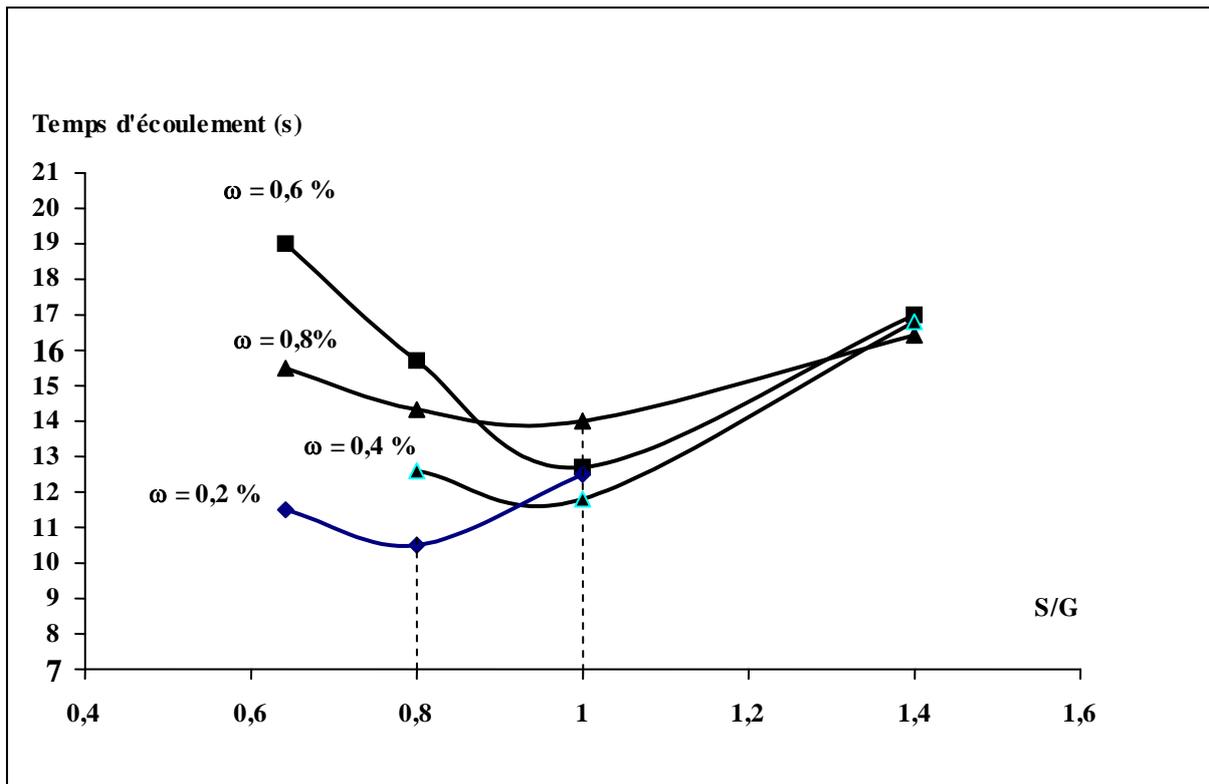


Figure II.14: Superposition des courbes Temps d'écoulement en fonction du rapport S/G pour chaque pourcentage (ω) de fibres.

II.4.4. Interprétation des courbes et discussion

Le temps d'écoulement du béton renforcé de fibres (B.R.F) augmente en fonction du pourcentage des fibres incorporées.

Le rapport S/G (Sable/ Gravier) optimum est de 0,8 pour le pourcentage en fibres de 0,2 % (voir figure II-10), il est de 1 pour les pourcentages de fibres allant de 0,4 à 0,8 % (voir figures II.11, 12, 13).

Il est à noter que le pourcentage de fluidifiant a été maintenu constant et vaut 0,05% du poids de ciment (5,7 g).

Afin de réduire le temps d'écoulement du B.R.F pour un pourcentage de fibre égale à 0,8 %, des essais ont été refaits en augmentant la quantité de fluidifiant. Celle-ci a été portée à 0,2 % du poids de ciment (22,8 g). Le temps d'écoulement est ainsi diminué à 10,5 secondes pour un rapport S/G=1 (voir figure II.13). La superposition de toutes les courbes moyennes obtenues est donnée à la figure II.14.

Les deux compositions retenues, pour 1 m³ de béton, pour la suite des essais sont les suivantes :

- pour un rapport S/G=0.8, on a la composition du béton suivantes:

Constituants de béton pour un volume de 1 m ³	Masse
Sable 0/3 (kg)	797
Gravier 3/8 (kg)	106,33
Gravier 8/15 (kg)	890
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C) (kg)	380
Eau (E) (kg)	206,52
Fluidifiant (0,05% du poids de ciment en g)	190

- pour un rapport S/G=1, on a :

Constituants de béton pour un volume de 1 m ³	Masse
Sable 0/3 (kg)	896,67
Gravier 3/8 (kg)	95,67
Gravier 8/15 (kg)	801
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (C) (kg)	380
Eau (E) (kg)	206,52
Fluidifiant (0,05% du poids de ciment en g)	190

II.5. PREPARATION DU BETON RENFORCE DE FIBRES METALLIQUES

II.5.1. Mode opératoire du béton

La préparation du mélange à été faite en respectant soigneusement les démarches suivantes :

- Peser le sable, les granulats (lavés puis séchés) et le ciment (figure II.15 et16).
- Introduction le sable, le ciment, et les graviers dans le malaxeur (figure II.17). Le tout est ensuite malaxé pendant 60 secondes.
- Introduire de l'eau puis malaxer pendant 40 secondes.
- Les fibres sont introduites en dernier, par petite quantité ; pour éviter la formation d'oursins ou encore « pelotes ». A chaque ajout, il y a malaxage pendant 10 secondes.
- Introduction du plastifiant (figure II.18) pendant le malaxage qui dure 30 secondes.

II.5.2. Confection des éprouvettes

Les moules d'éprouvettes pour les essais de compression, sont des corps d'épreuve de forme cylindrique de dimensions normalisés ($\Phi=16$ cm, $h=32$ cm), voir figure II.20. Pour les essais de traction, les éprouvettes sont confectionnées au laboratoire de Génie Civil, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (les dimensions sont données dans la figure II.30). Le remplissage des moules se fait avec délicatesse particulièrement pour les éprouvettes de traction afin d'homogénéiser le béton de fibres et bien répartir celles-ci au sein de la matrice (figure II.28, 29). Les moules remplis sont par la suite posés sur une table vibrante (à faible amplitude) pour évacuer les bulles d'air et éviter les cavités dans le béton frais (augmente la compacité du béton) (figure II.19).

Après 24 heures, les corps d'épreuves sont démoulés. Ils sont ensuite soumis, durant une semaine, à une cure sous chiffons maintenus humidifiés. Ils s'y séjournent dans les conditions ambiantes du laboratoire (température de l'ordre de 20 °C) pendant 28 jours.



Figure II.15: La balance électronique utilisée



Figure II.16: Pesage des granulats



Figure II.17: Le malaxeur de béton du laboratoire



Figure II.18 : Plastifiant MEDAFLOW-30 utilisé



Figure II .19: Table vibrante

II .6. ESSAIS MECANIQUES

II.6.1.Essais de compression

Les essais de compression simple ont été réalisés au laboratoire sur une presse hydraulique de type AUTOTEST pilotée par un micro-ordinateur. Sa capacité maximale est de 2000 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions des corps d'épreuves (éprouvettes cylindriques ou prismatiques...etc.). Les valeurs de la force et de la contrainte sont lues directement sur l'écran de la machine, l'évolution de la déformation est contrôlée à l'aide d'un extensomètre disposé directement sur l'éprouvette. Les valeurs enregistrées pour chaque étape de chargement sont ensuite tracées sous forme de courbe contrainte – déformation et ce jusqu'à rupture en compression.

II.6.1. 1. But de l'essai

Le résultat que l'on cherche à obtenir avec cet essai est la détermination de la résistance à la compression f_c (rapport entre la force appliquée/la section de l'éprouvette) du béton, évolution de la déformation et de la contrainte ainsi que son module de Young en compression E_{bo} .

II.6.1.2. Principe de l'essai

Les éprouvettes confectionnées (voir figure II.20), sont donc ajustées entre les deux plateaux de la presse. Le plateau supérieur étant fixe, le plateau inférieur sur lequel est posée l'éprouvette est mobile. En remontant celui-ci écrase le corps de l'éprouvette contre le plateau supérieur. Un extensomètre, placé sur la face latérale de l'éprouvette (Figure II.21) permet de mesurer les valeurs de la déformation. L'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante (soit 0,5MPa/s). Pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont enregistrées, et ce jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette qui se traduit par l'arrêt de la presse.

L'essai de compression est ainsi achevé. La charge maximale P est donnée dès que la rupture est enclenchée. Cette charge maximale servira à déterminer la résistance f_c , qui s'obtient comme étant le rapport de cette charge sur la section S de l'éprouvette, soit le rapport P/S . En exploitant tous les résultats obtenus, la courbe contrainte-déformation est ainsi tracée et ce, pour chaque pourcentage de fibres, voir figures II.22, 23, 24, 25, 26 et 27.



Figure II.20: Coffrage métallique de l'éprouvette de compression



Figure II.21.a : Presse à essai d'écrasement



Figure II.21.b: Essai de compression avec logiciel de commande

II.6.1.3. Résultats des essais en compression

Les résultats des essais de compression obtenus, pour différents pourcentage de fibres et différentes rapport Sable/Gravier de la composition du béton, sont représentés ci-dessous par les courbes contrainte-déformation (fig II.22 – II.27):

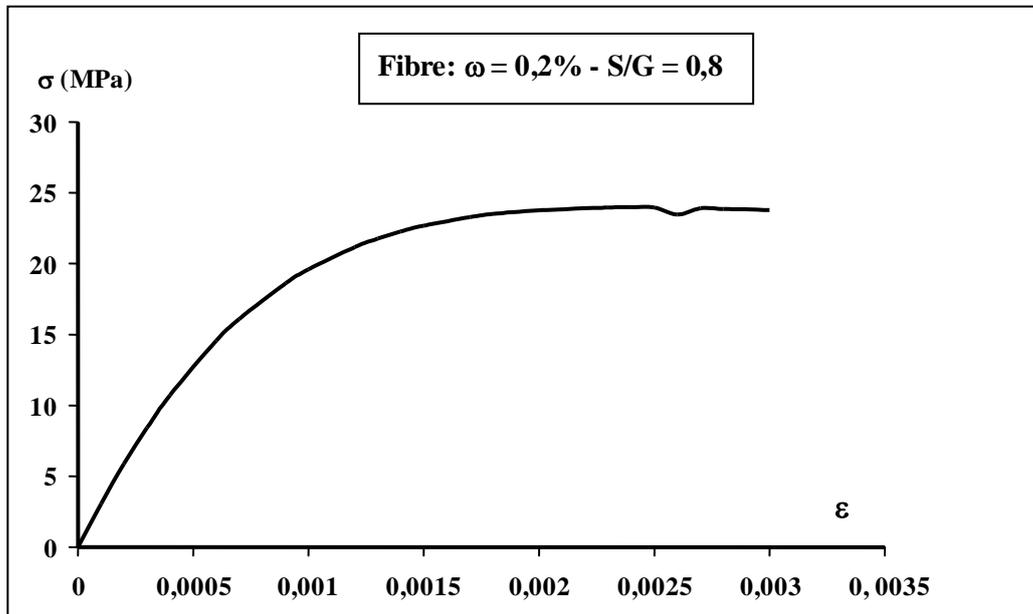


Figure II.22: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,2\%$

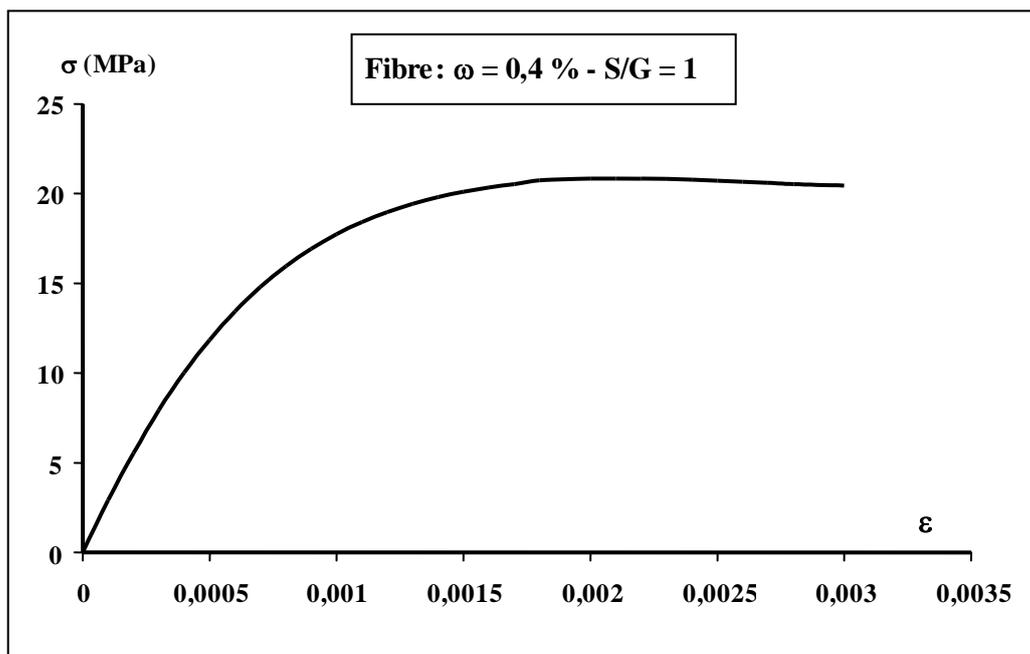


Figure II.23: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,4\%$

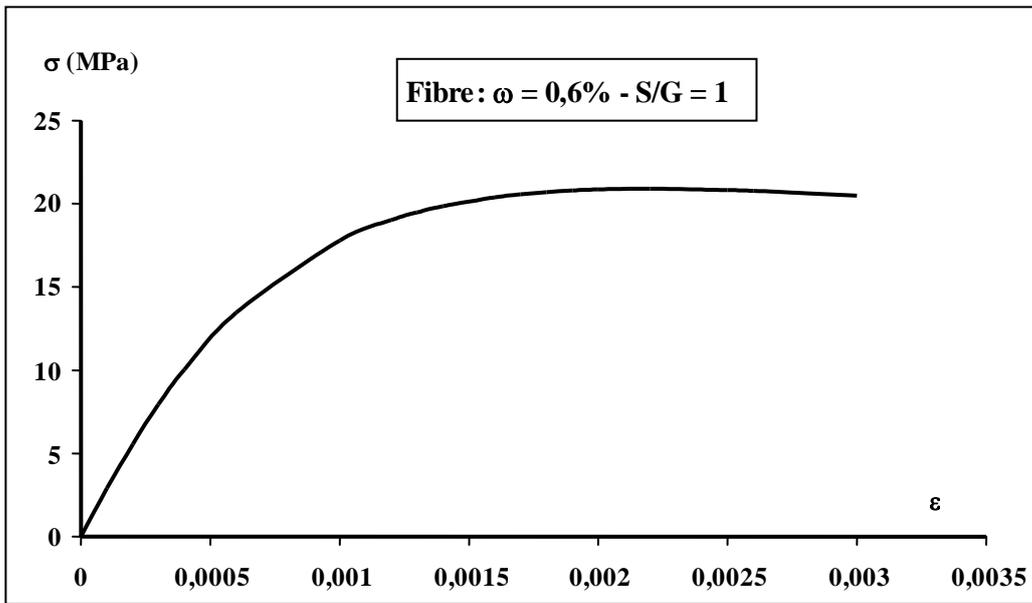


Figure II.24: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,6\%$

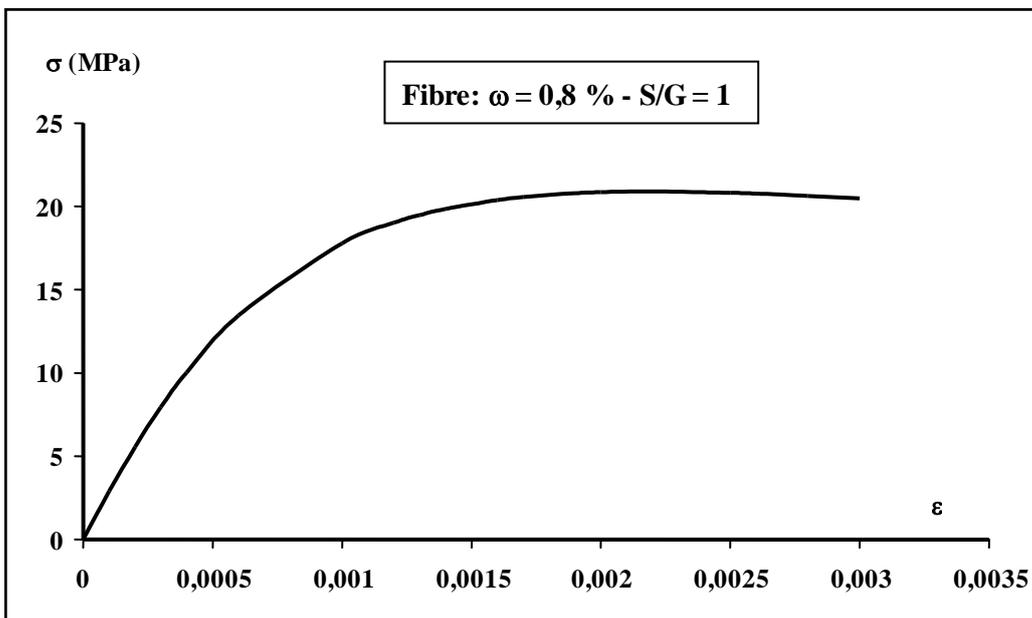


Figure II.25: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,8\%$

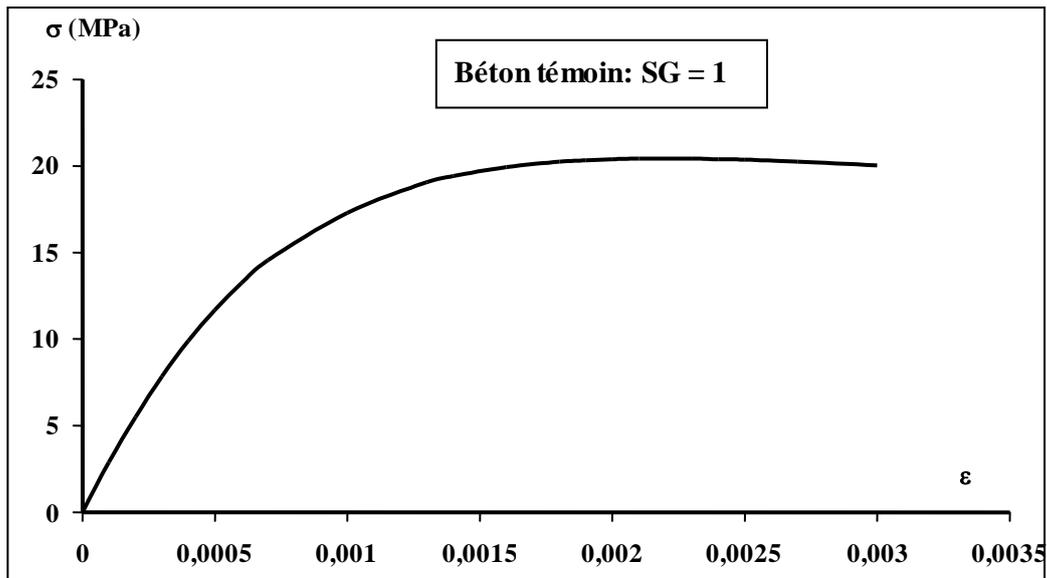


Figure II.26: Contrainte-déformation pour béton témoin avec S/G = 1

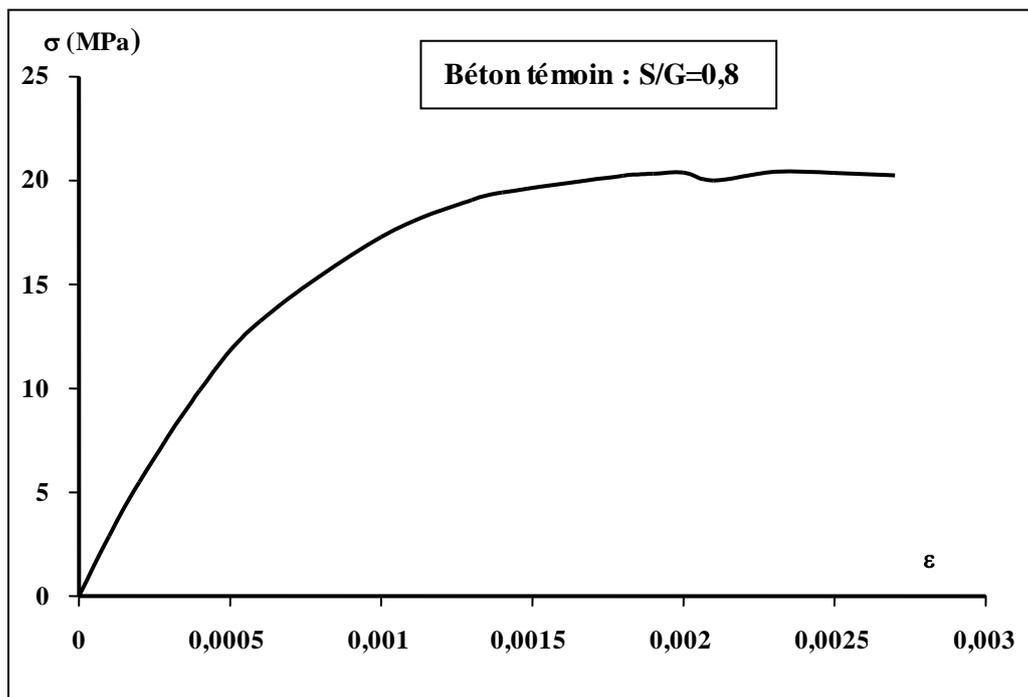


Figure II.27: Contrainte-déformation pour béton témoin avec S/G = 0,8

Dans le tableau ci-dessous, on regroupe les résultats obtenus pour le module de Young pour les différents essais de compression réalisés:

Tableau II.12: Valeurs des contraintes et modules de Young pour chaque pourcentage de fibres pour l'essai de compression :

% Fibres	f_{cj} (MPa)	E_{b0} (MPa)	
		E_{b0} exp	E_{b0} calculé
Béton témoin S/G=0,8	20	28700	29659
Béton témoin S/G=1	20,43	28837	30071
0,2%	24	30601	31725
0,4%	20,85	29079	30276
0,6%	20,89	29110	30295
0,8%	23,77	30668	31628

Avec :

E_{b0} exp, le module tangent à l'origine de la courbe qui est déterminé expérimentalement en traçant la tangente à l'origine des courbes expérimentales.

E_{b0} calculé, Le module calculé qui est déterminé à l'aide de la formule donnée par le BAEL* :

$$E_{b0} = 11\ 000 \sqrt[3]{f_{cj}}$$

II.6.1.4. Interprétation des courbes et discussion

Les courbes obtenues (fig II.22 – II.27) présentent toutes une partie droite dans le domaine élastique, puis ces courbes s'éloignent de cette droite. Le comportement devient non linéaire. Le maximum des courbes correspond à la résistance maximale f_{cj} et au-delà, les courbes présentent un palier de ductilité qui, dans certains cas, est décroissant jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette. Cette forme de courbe correspond bien au comportement réel du béton en compression.

On notera que l'ajout des fibres, en faible pourcentage, apporte une légère augmentation de la résistance, par contre en augmentant le volume des fibres, celle-ci tend plutôt à diminuer. Cela est probablement dû à la création d'une porosité au sein du matériau qui le fragilise.

II.6.2. Essais de traction directe

Les essais de traction directe ont été réalisés au laboratoire sur une presse hydraulique de marque Ibertest pilotée par un micro-ordinateur (voir figure II.33). Sa capacité maximale est de 200 KN, elle est programmée pour les essais de compression et les essais de flexion pour des éprouvettes en béton. Afin de réaliser des essais de traction directe sur des

éprouvettes en béton, il a fallu mettre en œuvre et imaginer un dispositif de fixation des éprouvettes sur les mors de la machine (voir figure II.32). Ce dispositif est fabriqué au sein de l'atelier (hall industriel de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou) par S. DJEBALI et rentre dans le programme de travail de sa thèse de doctorat. Les dimensions de ce dispositif ont été choisies en fonction de l'appareillage de l'Ibertest.

II.6.2.1. But de l'essai

Le résultat que l'on cherche à tirer de cet essai est l'identification de la résistance à la traction f_t du béton ainsi que son module de Young de traction E .

II.6.2.2. Principe de l'essai

Les éprouvettes à tester sont de forme géométrique prismatique. Le coffrage est en bois dur tapissé de film plastique pour assurer un meilleur état de surface des éprouvettes et faciliter le décoffrage (voir figure II.28, 30 et 31). Les éprouvettes réalisées sont soumises à l'essai, vingt huit jours après le coulage. L'essai de traction consiste d'abord à caler celles-ci entre deux mors de la presse hydraulique (voir figure II.33c). Le plateau supérieur est mobile et se déplace grâce à un système de pignons dentés actionnés par une chaîne; le plateau inférieur reste fixe. L'effort vertical de traction est appliqué progressivement à vitesse de chargement contrôlée (soit 0,005 MPa/seconde) et ce jusqu'à la rupture de l'éprouvette (voir figure II.40). Le logiciel Wintest 32 programmé pour cette presse enregistre, pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante qui sont présentées directement sous forme de graphes contrainte-déformation et force-déformation (voir figure II.34, 35, 36, 37, 38 et 39).



Figure II.28. a: Coffrage d'éprouvettes de traction

b: plastification de la surface intérieure



Figure II.29: Préparation d'éprouvettes pour l'essai de traction

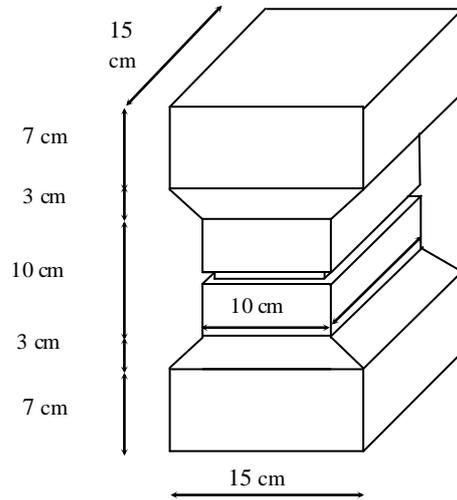


Figure II.30: Forme et dimensions de l'éprouvette de traction

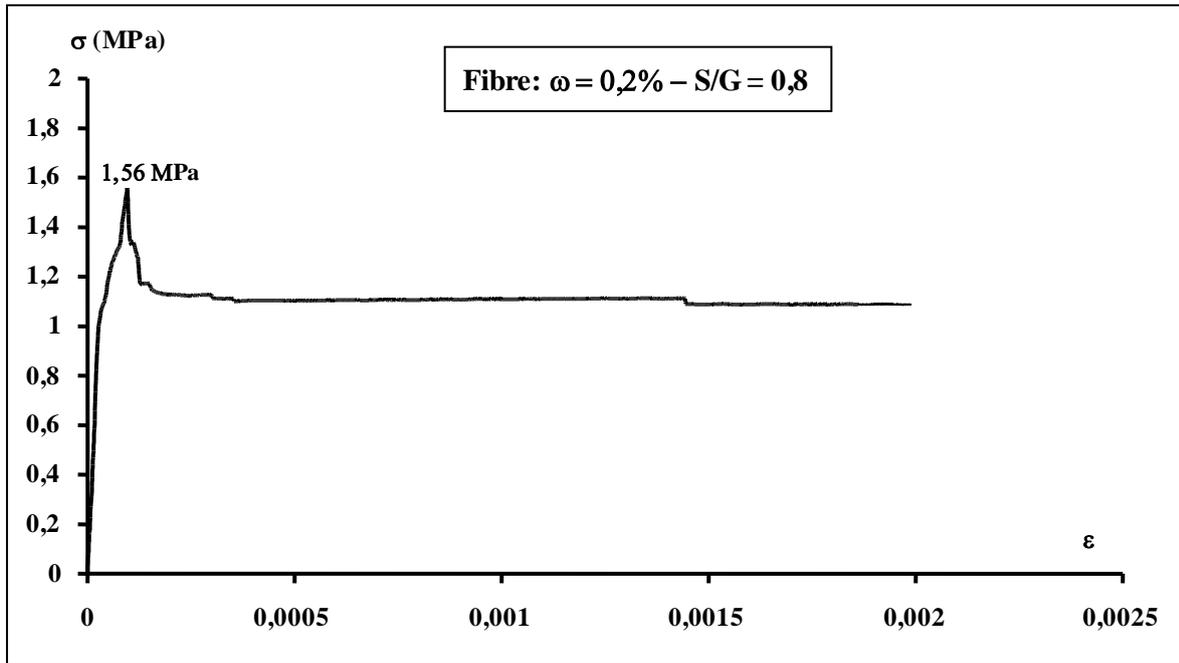


Figure II.34: Contrainte –déformation pour $\omega=0,2\%$

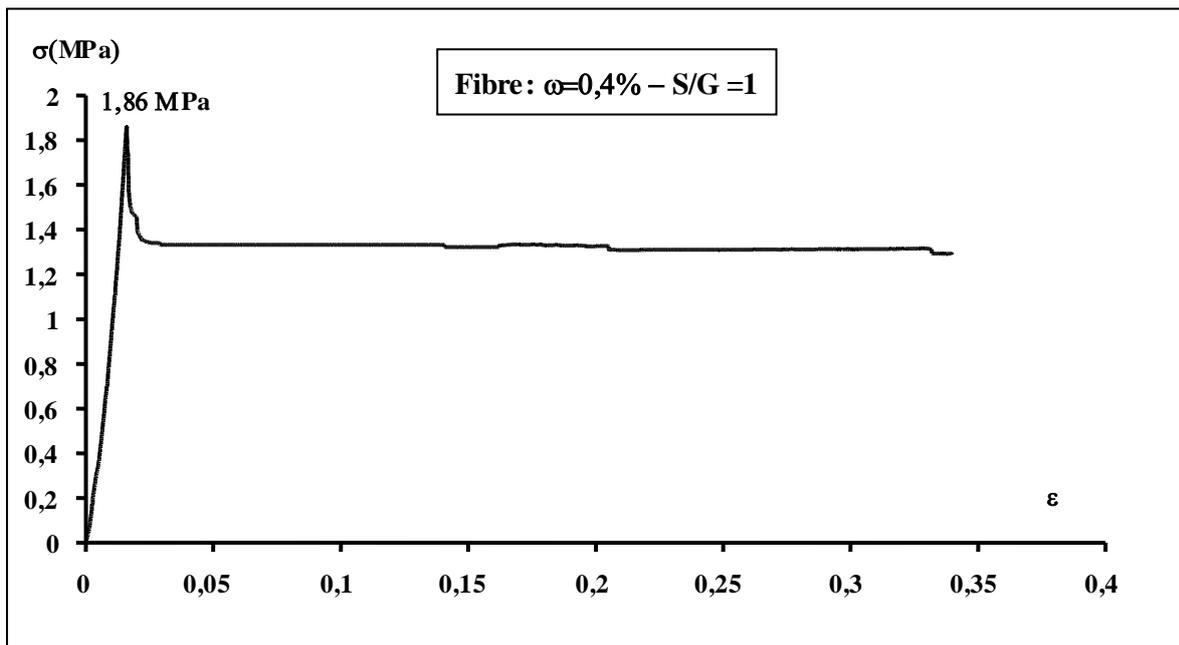


Figure II.35: Contrainte–déformation pour $\omega=0,4\%$

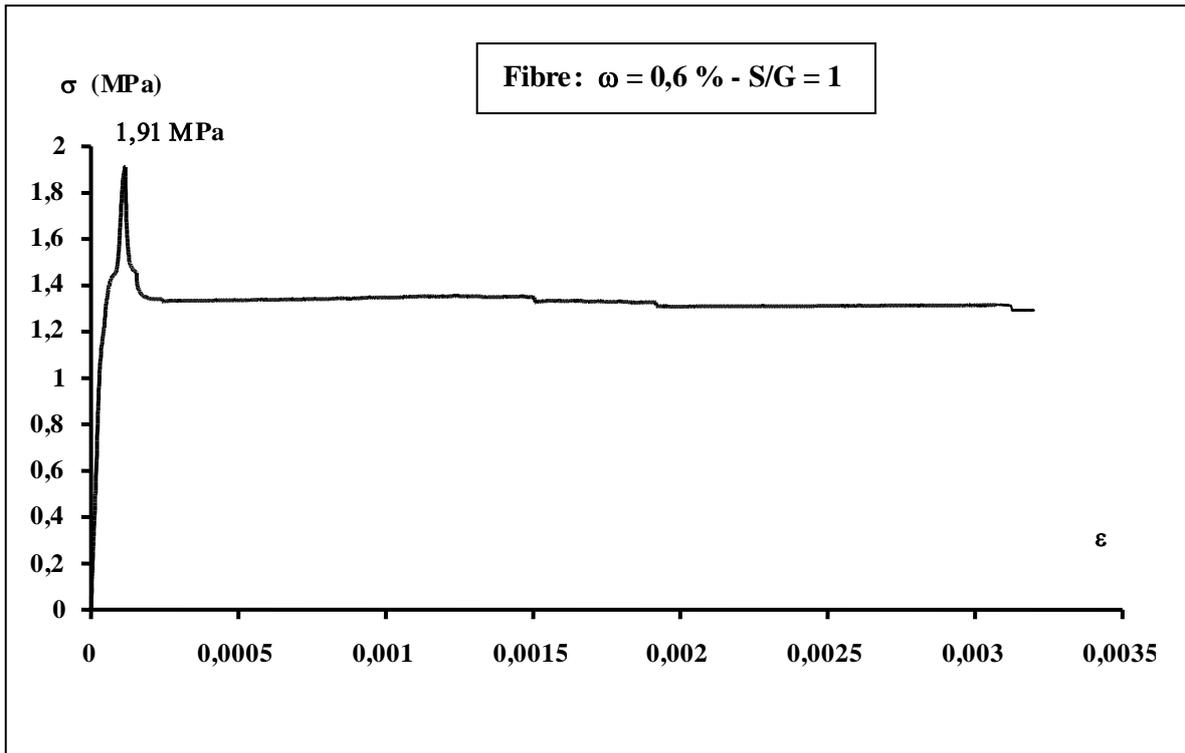


Figure II.36: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,6\%$

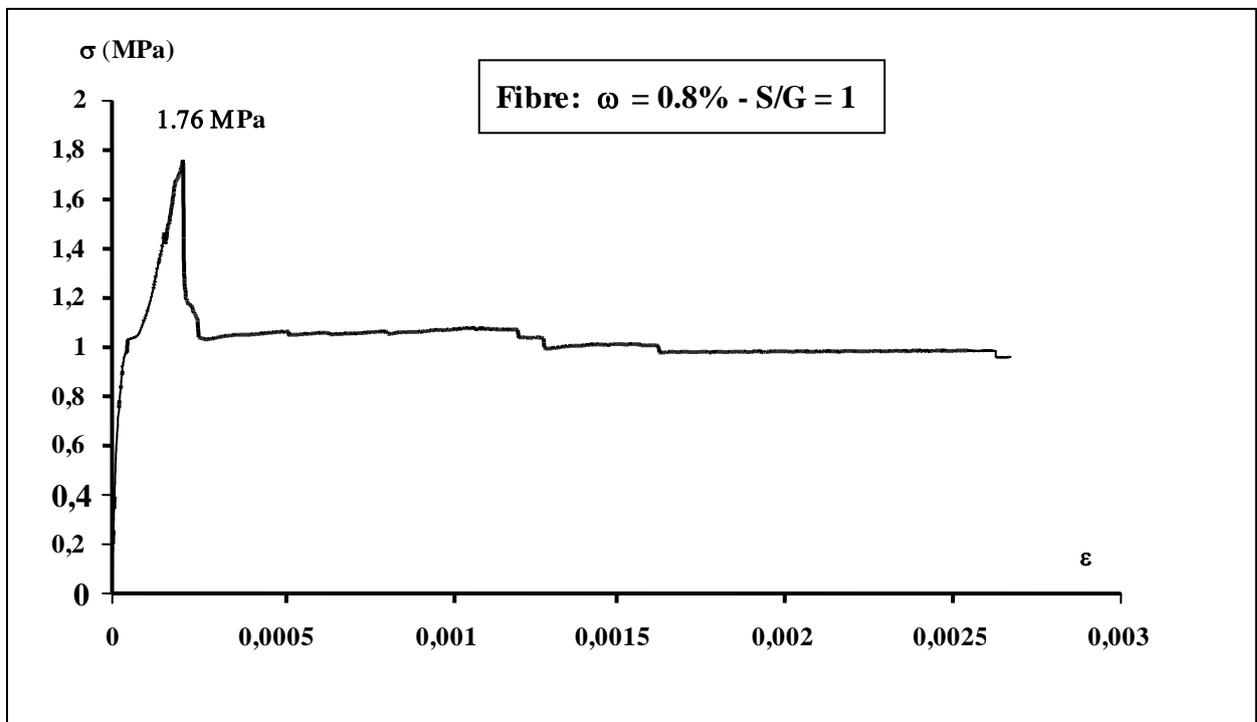


Figure II.37: Contrainte-déformation pour $\omega = 0,8\%$

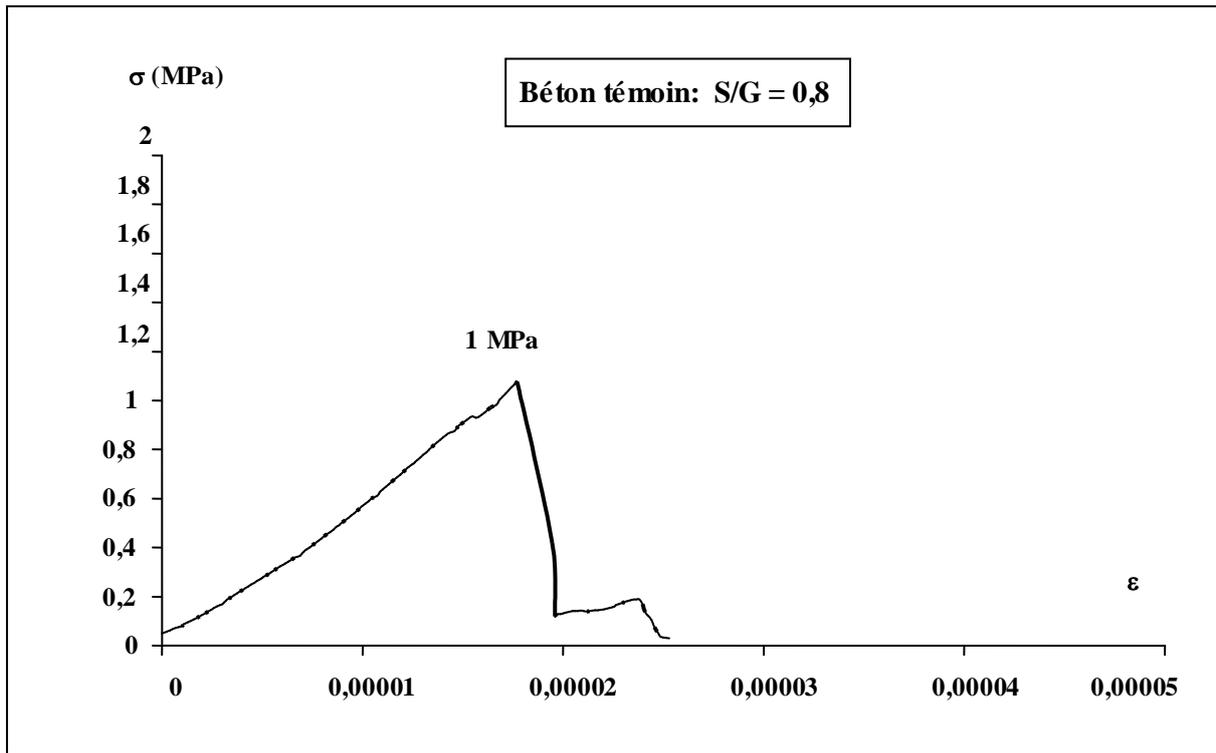


Figure II.38: Contrainte-déformation pour béton témoin avec $S/G = 0,8$

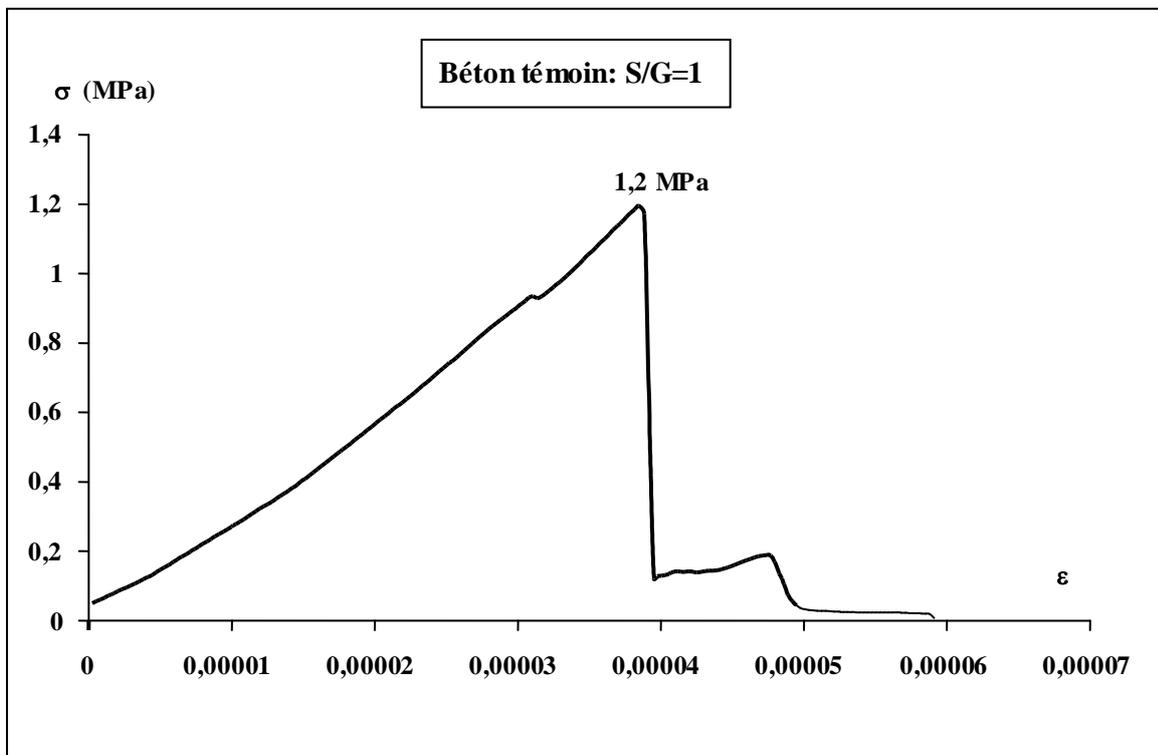


Figure II.39: Contrainte-déformation pour béton témoin avec $S/G = 1$

Mode opératoire avec les différentes étapes :



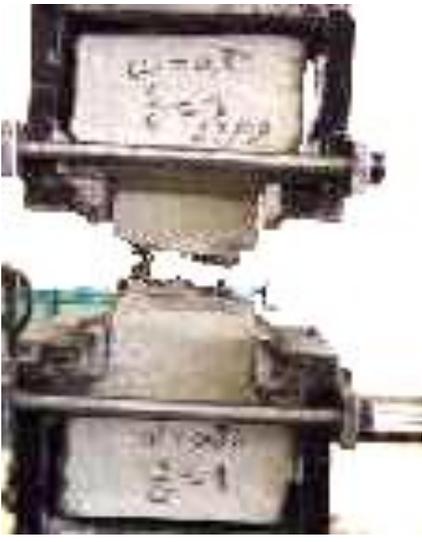
Etape 1: Début de la rupture



Etape 2: Apparition de la fissure



Etape 3: Rupture totale du béton



Etape 4: Les fibres se cassent

Figure IL.40: Etapes de l'essai de traction de l'éprouvette



Etape 1



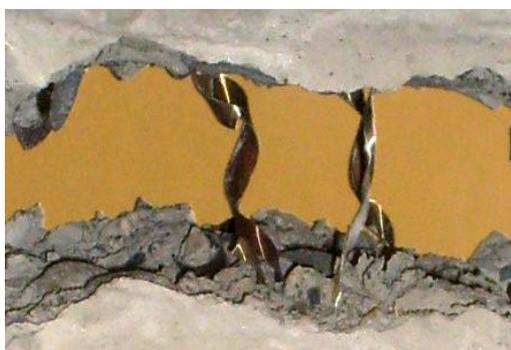
Etape 2



Etape 3



Etape 4



Etape 5



Etape 6



Etape 7

Figure II. 41: Différentes étapes d'étirement des fibres dans la partie fissurée durant l'essai de traction

II.6.2.4. Interprétation des courbes de traction et discussion

Sur les courbes contrainte-déformation du béton de fibres (figures II. 34, 35, 36 et 37), on peut distinguer trois phases de comportement:

1. Le comportement pré-fissuration qui se caractérise par le processus de propagation de microfissures avant la formation d'un système de fissures continues au droit de la section critique au pic. Le comportement avant pic des composites cimentaires renforcés de fibres en traction dévie de la linéarité quand la propagation des microfissures a déjà commencé.
2. Le comportement post-fissuration qui est marqué par l'ouverture d'une fissure au niveau de la section critique qui transmet pratiquement toutes les contraintes de traction aux fibres traversant la fissure. A partir de cet instant, c'est la décohésion des fibres qui fournit dans une large mesure la résistance à la traction après le pic.
3. La propagation d'une macro fissure se développe le long d'une section de l'éprouvette, perpendiculairement à la direction principale de traction. A ce stade, la rupture totale du composite se fait par rupture des fibres reliant les lèvres des fissures. Quand les macro-fissures se forment, les fibres reliant les lèvres des fissures sont mises en traction et s'étirent. Certaines s'allongent et s'aplatissent puis se cassent, d'autres s'arrachent et se décolent directement du béton, par contre certaines se rompent sans s'aplatir (voir figure II.35).

Dans le cas du béton témoin sans fibres, les courbes contrainte-déformation (figures II. 38 et 39), sont caractérisées par une phase pratiquement linéaire qui aboutit, dès l'apparition de la première fissure, à la rupture fragile du matériau.

L'idée qui se dégage de ce travail est que les fibres n'augmentent pas d'une manière nette la résistance à la traction. Par contre, elles procurent au matériau un pallier de ductilité et permettent de mieux contrôler la fissuration.

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs des contraintes et du module de Young pour différents rapports S/G.

Tableau II.13 : Valeurs des contraintes et modules de Young pour l'essai de traction.

% Fibres	f _{cj} exp	f _{ij} (MPa)		E _{ct} (MPa)	
		expérimentale	calculée	E _{ct} exp	E _{ct} calculée
B.témoin -S/G=0,8	20	1	1,8	25695	-
B.temoin -S/G=1	20,43	1,2	1,82	29631	-
0,2%	24	1,56	2,04	30634	31159
0,4%	20,85	1,86	1,85	30015	29962
0,6%	20,89	1,91	1,85	31371	30525
0,8%	23,77	1,76	2,03	32609	32531

La contrainte calculée est déterminée à l'aide de la formule donnée par le BAEL

$$f_{ij} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$$

Avec :

f_{cj}: résistance à la compression du béton.

f_{ij} : résistance à la traction du béton.

Le module de Young calculé est déterminé par la formule [16,17] :

$$E_{ct} = E_{b0} (1 + n\theta\omega)$$

Avec:

E_{ct} : module initiale du composite en traction.

E_{b0}: module initiale du composite en compression.

η : Coefficient d'équivalence acier-béton.

θ : coefficient d'orientation des fibres.

ω : pourcentage en volume des fibres.

II.6.3. Comparaison des valeurs du module de Young (valeurs mesurées, valeurs calculées en compression et en traction)

% Fibres	E_{b0} (MPa)		E_{ct} (MPa)	
	E_{b0} exp	E_{b0} Calculé	E_{ct} exp	E_{ct} calculé
B témoin S/G=0,8	28700	29659	25695	-
B témoin S/G=1	28837	30071	29631	-
0,2%	30601	31725	30634	31159
0,4%	29079	30276	30015	29962
0,6%	29110	30295	31371	30525
0,8%	30668	31628	32609	32531

Tableau II.14 : Valeurs des modules de Young pour l'essai de traction et compression

CONCLUSION

Les essais de traction directe ont pu être réalisés et ont permis de suivre le comportement de ce matériau au delà de la fissuration. Le palier de ductilité est mis en évidence sur les courbes tracées. Les caractéristiques mécaniques mesurées et calculées sont comparées dans les tableaux précédents. Il y a une assez bonne concordance entre ces valeurs. Cette étude a montré que les fibres adhèrent bien à la matrice. En effet cela est vérifié par le fait qu'au cours de la rupture de l'éprouvette, les fibres restent accrochées à la matrice jusqu'à leur rupture complète, elles ne s'extirpent pas de la matrice. Ce résultat peut s'avérer très intéressant lors l'écroulement d'une structure armée de ce type de fibres. Les différents éléments de la structure restent liés même après rupture.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au renforcement du béton par les fibres métalliques. Notre attention a été portée sur le comportement mécanique du BRFM et notamment la notion de fragilité (essentielle pour une utilisation de ce matériau), en comparaison avec un béton témoin sans fibres. La contrainte maximale à la traction, à la compression et la ductilité en traction ont pu être mises en évidence. Pour réaliser les éprouvettes d'essai, des fibres métalliques provenant de déchets d'ateliers d'usinage ont été utilisées.

L'étude de maniabilité du béton frais renforcé de fibres, faite au préalable, a montré que celle-ci diminue lorsque le pourcentage en fibres augmente. Pour un pourcentage de fibres maximal de 0,8%, le meilleur auxiliaire est obtenu lorsqu'on rajoute 0.2% du poids de ciment de fluidifiant. Des compositions de béton adéquates sont déterminées et ce en fonction du pourcentage en fibres incorporées.

Pour les essais de compression, les courbes obtenues présentent toutes une partie droite dans le domaine élastique, puis ces courbes s'éloignent de cette droite. C'est ce qui représente la partie non linéaire. Le maximum des courbes correspond à la résistance maximale f_{cj} et au-delà, la courbes présentent un palier de ductilité qui, dans certains cas, est décroissant jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette. Cette forme de courbe correspond bien au comportement réel du béton en compression.

On notera que l'ajout des fibres, en faible pourcentage, apporte une légère augmentation de la résistance, par contre en augmentant le volume des fibres, celle-ci tend plutôt à diminuer. Cela est probablement dû à la création d'une porosité au sein du matériau qui le fragilise.

Pour les essais de **traction directe** réalisés dans le cadre de ce travail, l'éprouvette réalisée présente une forme prismatique avec un rétrécissement dans sa partie centrale pour orienter la rupture à ce niveau. Les résultats des essais effectués montrent une légère amélioration de la contrainte maximale en traction mais surtout un palier de ductilité au delà de la fissuration on passe d'une rupture fragile à une rupture ductile.

De plus, seule une étude plus poussée et une observation au microscope pourrait nous renseigner sur l'adhérence même de ces fibres à la matrice. Par contre, il a été constaté que les fibres retardent la microfissuration et améliore le comportement post-fissuration en servant de

fil à coudre entre les différents blocs de béton. Le BRFM gagne en ductilité et la présence des fibres prolonge le palier de non linéarité.

Cette propriété peut s'avérer intéressante et d'utilité pratique en terme de sécurité puisque même après rupture les morceaux de béton restent rattachés les uns aux autres. C'est plus précisément dans cette voie qu'il faut orienter la suite des travaux. On peut améliorer sensiblement la résistance à la traction et la résistance à la flexion en nous intéressant à certains paramètres tels que : i) la longueur des fibres, ii) la géométrie de la fibre (plate, ondulée), iii) le dosage des fibres, iiiii) la disposition des fibres et éventuellement passer à des fibres longues orientées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- 1 **G. BERNIER**, Formulation des bétons. Techniques de l'ingénieur. C2 210
- 2 **P. ROSSI** (1991), "Formulation et comportement mécaniques des béton armé de fibres métalliques". Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°492-Mars-Avril 1991, série Béton 279.
- 3 **F. GABRYSIAK**, Matériaux- Les Bétons chapitre 04.
- 4 **P.K. MEHTA** (1986), " Concrete: structure, properties, and materials ", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986,450p
- 5 **E.N. ANTOINE**(1985), "Fibre reinforced for concrete", Concrete International design and Construction, Vol 7, N° 3, March 1985, pp.21-25.
- 6 **ACI COMMITTEE** (1984), "State of the art report on fibre reinforced concrete", Journal. American. Concrete Institute. March-April 1984, pp.140-146.
- 7 **M. BRAUN & A. MAJDIC** (1980), "Reinforcing castables with stainless steel fibres" Intercera, Vol 129, pp.113-118.
- 8 **H.F. PORTER**, "Preparation of concrete from selection of materials to final disposition". Journal American Concrete. Institute. Vol. 6, 1910, 296p.
- 9 **J.P. ROMUALDI & G.B. BATSON**(1963), "Mechanics of crack arrest in concrete". Proceeding of American. Society of Civil Engineers, Vol.89, June 1963, pp.147-168.
- 10 **J.P. ROMUALDI & G.B. BATSON** (1963); "Behaviour of reinforced concrete beams with closely spaced short lengths of wire reinforcement". Journal. American. Concrete Institut Vol.60, N°6, June 1963, pp.775-789.
- 11 **D.R. LANKARD & H.D. SHEETS** (1971) ; " Use of steel wire fibres in refractory castables" . Am. Cer. Soc., Vol. 63, No.7, 1971.
- 12 **A. BOUHERAOUA**, Effets des fibres bi-ondulées sur le comportement du béton, étude expérimentale, Thèse de magister 2006, Université Mouloud Mammeri de Tiz-Ouzou.
- 13 **P. ROSSI, N. HARROUCHE, F. LEMOU** (1989), "Comportement mécaniques des béton armé de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annales de L'ITBTP, N° 479, 1989.
- 14 **A. ADJRAD** (2000); "Renforcement du béton par des copeaux métalliques, étude expérimentale et modélisation", Thèse de magister 2000. Université Mouloud Mammeri de Tiz-Ouzou.
- 15 **G. DREUX et J. FESTA** (1995), "Nouveau guide de béton et de ses constituants". Edition EYROLLES.7^{ème} Edition 1995.

- 16 **P. ROSSI, N. HARROUCHE, A. BELLOC** (1989), "Méthode de composition des bétons de fibres métalliques", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°475 juin-juillet 1989, série Béton 266.
- 17 **Y. BOUAFIA, B. FOURE, M .S. KACHI** (1998), "Relation effort- ouverture des fissures dans le cas du béton de fibres d'acier", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°2, Avril 1998,
- 18 **Y. BOUAFIA, B. FOURE, M .S. KACHI** (2002), "Relation contrainte- déformation en traction du béton armé de fibres d'acier", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°3, Juin 2002,
- 19 **Y. BOUAFIA, A.ADJRAD,** (1997), "Utilisation des fibres de récupération pour le renforcement du béton ", Séminaire National de Génie Civil, M'SILA, 16-17 novembre 1997, volume 1, matériaux de construction.
- 20 **S.DJEBALI, D.ATLAOUI, Y.BOUAFIA,** (2010), "Caractérisation en traction directe du béton de fibres métalliques", Colloque International, ACMA 2010, Marrakech, Maroc, 12-14 mai 2010.