



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

Le béton de fibres métalliques

- Technologie.
- Propriétés.

Proposé par :

Dr. Fedghouche Ferhat

Présenté par :

Mahiout Meriem

Promotion 2015

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciement :

Je remercie, avant tout, « Dieu le Tout Puissant » de m'avoir donné patience, santé et volonté afin de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement, mon encadreur, le docteur FEDGHOUCHE FERHAT, Chef de département de l'infrastructure de base ENSTP, pour ses orientations et ses conseils durant la réalisation de ce travail.

A tous les enseignants de l'ENSTP sans exception, qui ont contribué à ma formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Je tiens également à remercier les techniciens du CNERIB, Mr BELHOUTE et Mr BENDAOUUD qui m'ont assisté lors de la réalisation de mes essais au sein de leur laboratoire.

Et sans oublier le directeur du CNERIB Mr AFRA qui m'a accueilli au sein de son établissement.

Mahiout Meriem

ملخص :

ندعو خرسانة الألياف الخرسانة التي تضمنت ألياف هذه الألياف الخاصة ذات مقاومة جيدة ضد الشد لكي تحسن مقاومة المواد و مكافحة ظهور التصدعات ونشرها وذلك بفعل الخياطة (خياطة الشقوق)، والألياف تحسن هكذا سلوك ما بعد الإنشاق.

فان الغرض من هذا العمل هو ان تثبت كفاءة الألياف المعدنية المضافة في الخرسانة و تثبيت تحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة المحتوات على الألياف المعدنية و خاصة المرونة. و تثبيت فعاليته في مكافحة ظهور التصدعات.

ومن ثم حماية و استدامة الهيكل.

كلمات مفتاحه: الألياف المعدنية، الخرسانة.

Résumé :

On appelle béton de fibres, un béton dans lequel on a incorporé une armature par inclusion directe de fibres, ces fibres sont assimilables à un granulats spécial de forme très allongée et de bonne résistance à la traction, susceptible d'améliorer légèrement la résistance à la traction du matériau et de ralentir la propagation des fissures. En agissant comme par effet de couture (coudre les fissures), les fibres améliorent ainsi le comportement post fissuration de la matrice en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations.

Le but de ce travail est alors de démontrer l'efficacité de l'incorporation de ces fibres dans le béton, et de prouver l'amélioration de ses propriétés mécaniques en particulier sa ductilité, et son efficacité à retarder l'apparition des fissures, et donc de préserver la pérennité de la structure.

Mots clés : béton, béton fibré, fibres métalliques.

Summary:

We call fibers concrete, a concrete into which we incorporated an armature by direct inclusion of fibers, these fibers are comparable to a special aggregate of much lengthened shape and good traction resistance, susceptible to improve slightly the traction resistance of the material and to slow down the distribution of cracks. By acting as by effect of sewing (of sew cracks), fibers so improve the behavior comment fissuring of the matrix by maintaining a portance strong during the increase of the deformations.

The purpose of this work is then to demonstrate the efficiency of the incorporation of these fibers in the concrete, and to prove the improvement of its mechanical properties in particular its pliability, and its efficiency to delay the appearance of cracks

Key words: concrete, metallic fibers.

Sommaire :

Chapitre 01 : « Introduction ».

Introduction	2
Recherche bibliographique	3

Chapitre 02 : « Connaissance du matériau ».

Béton ordinaire	5
Béton fibré	9

Chapitre 03 : « Matériaux utilisés ».

Ciment	14
Granulats	14
Adjuvant	15
Fibres Métalliques	16

Chapitre 04 : « Formulation et Composition ».

Béton ordinaire	20
Béton fibré	20
Confection des éprouvettes	23

Chapitre 05 : « Essais sur béton frais ».

Essai du cône d'Abrams.....	25
-----------------------------	----

Chapitre 06 : « Essais sur béton durci ».

Essai de compression	27
Essai de flexion	28

Chapitre 07 : « Résultats et Discussion ».....

Chapitre 08 : « Conclusion ».....

Annexe

Liste des figures :

Figure 1: brevet sur béton fibré de H.ETHERIDGE.....	3
Figure 2: les constituants du béton.....	5
Figure 3: l'essai de compression simple.....	6
Figure 4: diagramme contrainte/déformation à vitesse de chargement constante.....	6
Figure 5: influence de la quantité d'eau sur le retrait.....	8
Figure 6: évolution des déformations dans le temps.....	8
Figure 7: les fibres de verre.....	10
Figure 8: les fibres métalliques.....	10
Figure 9:l'effet de l'incorporation des fibres.....	11
Figure 10: le ciment utilisé.....	14
Figure 11: Gravier 15/25.....	14
Figure 12: gravillon 8/15.....	15
Figure 13: sable utilisé.....	15
Figure 14: l'adjuvant utilisé.....	15
Figure 15: Fibres métalliques, FIBRAL.....	16
Figure 16: redressement des fibres.....	17
Figure 17: les fibres HE++ 75/50.....	18
Figure 18: confection des éprouvettes 15 x 30 (cm).....	23
Figure 19: confection des éprouvettes 7x7x28 (cm).....	23
Figure 20: détermination de l'affaissement avec le cône d'Abrams.....	25
Figure 21: l'affaissement d'un béton témoin.....	25
Figure 22: la machine pour essai de compression.....	27
Figure 23: surfaçage des éprouvettes.....	27
Figure 24: vérification de la conformité aux normes des éprouvettes.....	28
Figure 25: la machine de l'essai de flexion.....	28
Figure 26: courbe effort/déformation du béton ordinaire.....	31
Figure 27: l'éprouvette du béton témoin après rupture.....	31
Figure 28: courbe effort/Déformation du béton fibré type 01.....	32
Figure 29: courbe effort/déformation du béton fibré type 02.....	32
Figure 30: l'éprouvette du béton fibré type 02 après rupture.....	33

Liste des tableaux :

Tableau 1: les domaines d'emploi des principales fibres.....	12
Tableau 2: la teneur (%) des éléments chimiques présent dans la fibre "FIBRAL".	16
Tableau 3: les dimensions des fibres FIBRAL.....	17
Tableau 4:compostion chimique des fibres HE ++ 75/50.....	18
Tableau 5: les constituants de la matrice.....	21
Tableau 6: la composition de notre béton fibré.....	21
Tableau 7: les constituants de la matrice.....	22
Tableau 8: la composition de notre béton fibré.....	22
Tableau 9: les caractéristiques de la machine.....	28
Tableau 10: les résistances à la compression obtenues à 14 jours.....	30
Tableau 11: l'effort max obtenus des essais de résistance à la flexion à 14 jours.	30

Chapitre 01 : Introduction.

1. Introduction :

Les domaines d'application du béton s'élargissent sans cesse et requièrent des matériaux plus performants et mieux adaptés.

La recherche et l'expérience acquise ont permis de déboucher sur de nouvelles générations de béton permettant l'obtention de construction plus durable, plus rapide, plus résistante et surtout plus économique.

Parmi ces bétons, on peut citer :

- Les bétons de hautes et très hautes performances.
- Les bétons légers.
- Les bétons à prise et à durcissement rapide.
- Les bétons de fibres.

Le béton de fibres est la solution technique trouvée pour améliorer les performances mécaniques du béton.

Vu que ce dernier est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction, mais qu'il résiste très mal à la traction et à la fissuration.

Les conditions d'environnement chauds et secs, tels que la région saharienne de notre pays, dessèchent les bétons hydrauliques, ce qui induit à des retrait important et des fissures dans les structures, le renforcement du béton par des fibres est la solution la plus adéquate pour résoudre ce problème [1].

2. Recherche bibliographique :

Les brevets sur les bétons renforcés par les fibres ont été établis pour la première fois en 1874 par A. Bérard de Californie (USA). Il a suggéré l'ajout à un mélange de béton, des granulats en fer pour créer une pierre artificielle.

R. Weakly déposa un brevet en 1912 pour l'utilisation des bandes en fil d'acier fabriquées avec 2 fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1918, le français **H. Halfsen** propose de mélanger au béton de petits éléments longitudinaux en fer (fibres) en bois ou en d'autres matériaux dans le but d'améliorer sa résistance à la traction.

En 1920, l'allemand **A. Kleilogel** proposa d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée comme une masse d'acier.

En 1927, **G. Martin** (USA) recommande le malaxage de plaquettes d'acier ou de fils d'acier emboîtées avec le béton qui sert à la fabrication de de tuyau.

L'idée d'améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution est assez ancienne. **H. ETHERIDGE** (USA) proposa en 1933 d'ajouter au béton des fibres en formes d'anneau de différents diamètres pour améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue du béton utilisé dans la construction des voies ferrées [2].

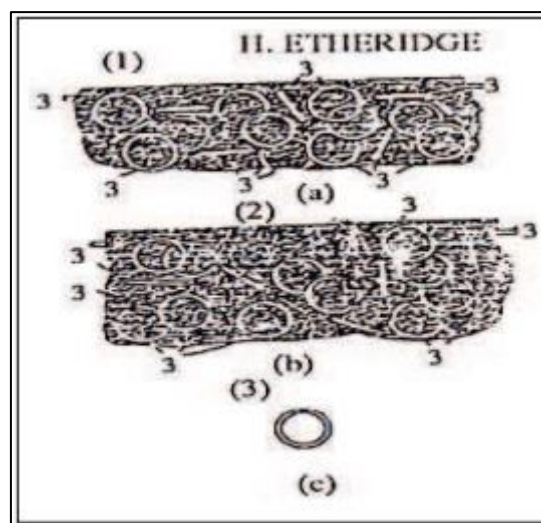


Figure 1: brevet sur béton fibré de H. ETHERIDGE.

La technologie du béton renforcé de fibres a connu deux périodes selon **G.CHANVILLARD**, la première allant du début du 20ème siècle aux années soixante est caractérisée par l'incertitude et les spéculations sur les performances réelles de ce composite et la deuxième qui à débiter à partir des années soixante a vu naître une sorte d'éveil dans ce domaine, dans cette seconde période les moyens techniques ont permis d'envisager des essais pilotés en déformation et il s'en est suivi une période d'expérimentation intense. [3]

En 1963, deux articles ont été publiés par **ROMUALDI** et **BATSON** dans ces deux articles, qu'on peut qualifier comme des essais pilotés 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. [4,5]

La fin des années soixante a ainsi connu la participation d'un grand nombre de chercheurs afin d'orienter les axes de recherches vers l'application du béton fibré dans le domaine de la construction, les travaux se multiplient et une multitude de types de fibres a été introduite dans le commerce, le plus grand progrès dans ce domaine à commencer dans les années soixante-dix avec l'incorporation des fibres d'aciers dans l'industrie du béton réfractaire.

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**, dans cet article, ces auteurs confirment que l'ajout de fibres au béton entraîne l'amélioration significative de sa résistance de sa ténacité et de sa durabilité. [6]

Chapitre 02 :

Connaissance du matériau.

1. Béton ordinaire :

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite. La forme la plus ancienne du béton remonte à **7000** ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland.

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci [7].

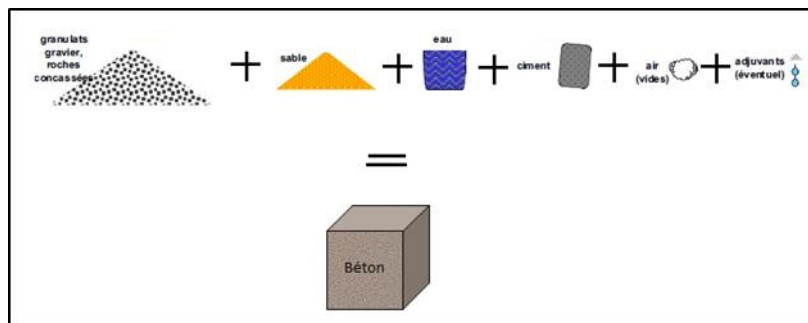


Figure 2: les constituants du béton.

1.1- Les propriétés mécaniques et physiques du béton :

Les propriétés du béton dérivent de ses constituants, c'est-à-dire :

- Leur qualité.
- Leur quantité relative (dosage).
- Leur mise en œuvre (malaxage, vibration).
- Les circonstances de durcissement.
- L'âge du béton.

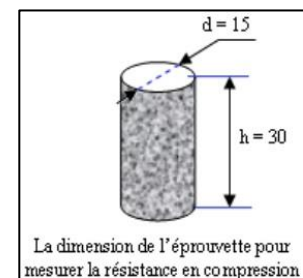
Les propriétés mécaniques et physiques du béton sont indispensables pour le dimensionnement des ouvrages [8].

a. La résistance à la compression :

La résistance en compression du béton est désigné conformément à la norme NF EN 206-1 et est mesuré sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques.

La résistance varie selon la taille et la forme, exemple :

$$f_{ck \text{ cube}} = f_{ck \text{ cyl}} + 20\%$$



Avec :

- $f_{ck, cube}$: résistance à la compression caractéristique sur cube.
- $f_{ck, cyl}$: résistance à la compression caractéristique sur cylindre.

La résistance à la compression du béton est mesurée grâce à l'essai de compression simple :



Figure 3: l'essai de compression simple.

b. La résistance à la traction :

La résistance à la traction à « j » jours du béton est déduite en générale par sa résistance à la compression par la relation suivante :

$$F_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad [\text{MPa}]$$

Avec :

- F_{cj} : Résistance mécanique à la compression à j jours.
- F_{tj} : Résistance mécanique à la traction à j jours.

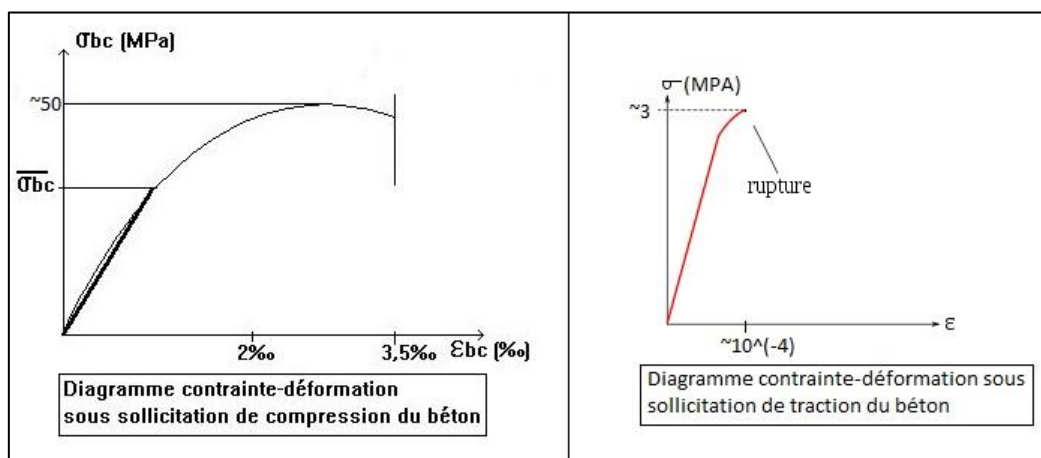


Figure 4: diagramme contrainte/déformation à vitesse de chargement constante.

c. Le retrait :

On appelle retrait le raccourcissement graduel du béton au cours de son durcissement.

On distingue les types suivants de retrait :

- **Le retrait plastique**, dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du béton frais après sa mise en place, peut conduire à la formation de fissures superficielles qui n'atteignent que quelques millimètres ou centimètres de profondeur. Ce retrait peut influencer l'aptitude au service mais pas le comportement statique général de la structure.
- **Le retrait chimique** (ou intrinsèque) n'a pratiquement pas d'effet sur le comportement de la structure.
- **Le retrait thermique** résulte de l'augmentation de température due aux réactions chimiques d'hydratation. A son maximum, la température du béton peut atteindre 40 à 50°C lors de la prise. La diminution de température qui se produit ensuite provoque des gradients de déformation qui induisent des autocontraintes qui peuvent provoquer des fissures à la surface du béton, plus froide que le cœur de la section. Le retrait thermique peut avoir un effet important sur les autocontraintes dans la section transversale tandis que son influence sur le comportement général de la structure est souvent négligeable.
- **Le retrait endogène** (appelé aussi retrait d'hydratation) est une conséquence de la consommation interne d'eau lors de l'hydratation du ciment. Ce retrait ne devient important que lorsque le rapport eau/ciment (E/C) est petit. Il reste inférieur à **0.1 mm/m** pour des bétons avec $E/C > 0.45$ alors qu'il peut atteindre **0.3 mm/m** quand le rapport E/C est inférieur à **0.4**.
- **Le retrait de dessiccation** (ou de séchage) se produit par diffusion de l'eau vers les faces exposées au séchage en présence d'un gradient hydrique entre le béton et l'air ambiant. Ce retrait se produit très lentement et dure plusieurs années. Il peut avoir des conséquences importantes sur le comportement statique de la structure. Le retrait de dessiccation varie généralement entre 0.2 et 1.0 mm/m.
- **Le retrait de carbonatation** est généralement négligeable pour le comportement structurel.

L'expérience montre que le retrait du béton est fonction de nombreux paramètres :

- La qualité et le type du ciment, les bétons riches en ciment ont un retrait plus important.
- La qualité d'eau de gâchage, un rapport E/C plus élevé correspond à un retrait plus prononcé.
- Le retrait varie selon le degré d'humidité et la température de la région.

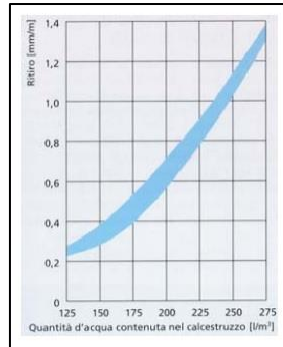


Figure 5: influence de la quantité d'eau sur le retrait.

d. Le fluage :

Une contrainte appliquée sur le béton à l'état de service a comme effet une déformation élastique instantanée et une déformation supplémentaire appelée déformation de fluage qui augmente graduellement dans le temps.

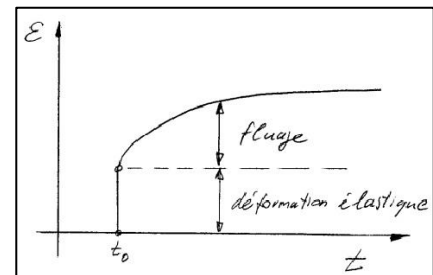


Figure 6: évolution des déformations dans le temps.

e. Le coefficient d'élasticité :

Le coefficient d'élasticité dit aussi le module de Young, existe sous deux formes :

Sous les contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on a :
Le module de déformation longitudinale instantanée du béton « E_{ij} ».

$$E_{ij} = 11000 (f_{cj})^{1/3}. \quad E_{ij} \text{ et } f_{cj} \text{ en MPA.}$$

Sous les contraintes de longue durée d'application (les déformations différées du béton comprennent le retrait et le fluage).

Le module de déformation longitudinale différée du béton « E_{vj} » : permet de calculer la déformation finale du béton (déformation instantanée + déformation retrait et fluage).

$$E_{vj} = 3700 (f_{cj})^{1/3} = E_{ij}/3.$$

f. La masse volumique :

La masse volumique « ρ » des bétons courants est compris entre 2,2 et 2,4 t/m³.

2. Le béton fibré :

Le béton renforcé de fibres est un matériau composite, constitué d'un mélange rendu homogène de ciment, de granulats, d'eau et de fibres convenablement réparties mais d'orientations aléatoires. L'addition peut se faire soit, par injection de fibres à l'aide d'une pompe spéciale dans la toupie, soit par mélange à sec avec les granulats pendant le malaxage. Certains industriels fournissent aussi du béton prêt à l'emploi avec les fibres.

Les fibres ont généralement pour rôle de compléter les armatures traditionnelles. Leur répartition dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile de celui-ci en traction, en s'opposant à la propagation des microfissures. Grâce à leurs propriétés, elles permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architecturale [9].

2.1- Les différents types de fibres :

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine [10] :

- naturelles minérales et végétales (amiante, cellulose).
- synthétiques d'origine minérale (verre, carbone, **fibres métalliques**).
- synthétiques organiques (polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide).

a. Les fibres de verre :

Les fibres de verre sont des renforts très efficaces en raison des qualités mécaniques, en particulier de rigidité de leur matériau constitutif. Cependant, soumises à l'environnement physico-chimique du béton, elles entrent naturellement dans une réaction pouzzolanique, qui leur fait perdre leur qualité.

Pour pouvoir être utilisées dans le béton elles doivent, soit être traitées par ensimage, soit être protégées au moment de leur emploi par ajout dans la gâchée de polymères, soit enfin avoir été fabriquées avec un verre au zirconium. Cette dernière solution étant la plus pratique. Les fibres de verre présentent d'excellentes caractéristiques, leur résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier et leur coefficient de dilatation est sensiblement égal à celui de la pâte de ciment. Leur domaine d'utilisation est essentiellement la fabrication de panneaux très minces, inférieurs à 20 mm d'épaisseur, de tuyaux d'assainissement, d'éléments décoratifs préfabriqués, etc...



Figure 7: les fibres de verre.

b. Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques diffèrent par leur forme pour assurer un bon ancrage dans le béton durci. Selon la teneur en carbone, les fibres donnent des valeurs différentes de limite élastique et d'allongement à la rupture. L'aspect critique des bétons de fibres étant leur capacité à être fabriqués sans que le malaxage ne provoque d'amoncellements localisés de fibres (de type «oursin »). Pour faciliter cette étape du processus, certains fabricants proposent des fibres pré-agglomérées, qui ont la capacité de se disperser dans le malaxeur. L'alcalinité naturelle du béton protège généralement les fibres métalliques de la corrosion. Pour les environnements très agressifs, il est préconisé d'utiliser des fibres à base de métal inoxydable comme la fonte amorphe.



Figure 8: les fibres métalliques.

c. Les fibres végétales :

Les fibres végétales présentent en général des caractéristiques mécaniques médiocres, insuffisantes pour améliorer les caractéristiques d'une matrice à base de liant hydraulique. Elles ont surtout été essayées dans une optique d'allègement et d'amélioration des performances thermiques de la matrice ou alors avec des matrices à base de terre. Par ailleurs, elles possèdent à l'état brut une très mauvaise tenue au vieillissement.

d. Les fibres de Carbone :

Les fibres de carbone, dénommées aussi fibres de graphite, sont d'autant plus résistantes que les plans de graphite sont orientés parallèlement à l'axe de la fibre. Ces fibres sont plus coûteuses que la fibre de verre et leur utilisation se limite quasiment au renforcement des matériaux constitués de liant d'origine synthétique peu utilisés dans la construction.

2.2- Les propriétés des fibres :

Des fibres de toute nature ont été expérimentées pour renforcer des bétons et des mortiers.

La compatibilité chimique avec la pâte de ciment, et les caractéristiques mécaniques sont les qualités à atteindre des fibres. Le béton ordinaire présente une loi de comportement en traction à caractère fragile. Cette loi se modifie lorsqu'on incorpore des fibres au béton. Ce dernier, au lieu de se rompre brutalement, s'allonge tout en se micro-fissurant. Les fibres ayant pour rôle de différer la rupture en s'opposant à la propagation des fissures (**effet de couture**) comme il est montré dans la figure 9. L'amélioration apparente de résistance à la traction ne se trouve pas au niveau de la compression, qui n'est pratiquement pas modifiée. Parmi les autres propriétés qui concernent l'amélioration des résistances mécaniques des bétons, on peut citer la résistance aux jeunes âges, la résistance aux chocs, la résistance au cisaillement et la résistance à l'usure et à l'abrasion. Certaines fibres, comme les fibres synthétiques, peuvent apporter aux bétons des améliorations en matière de plasticité et de moulage. Les aspects de surface obtenus avec les bétons de fibres synthétiques et les fibres de verre, sont appréciables pour les bétons apparents et les bétons architectoniques [11].

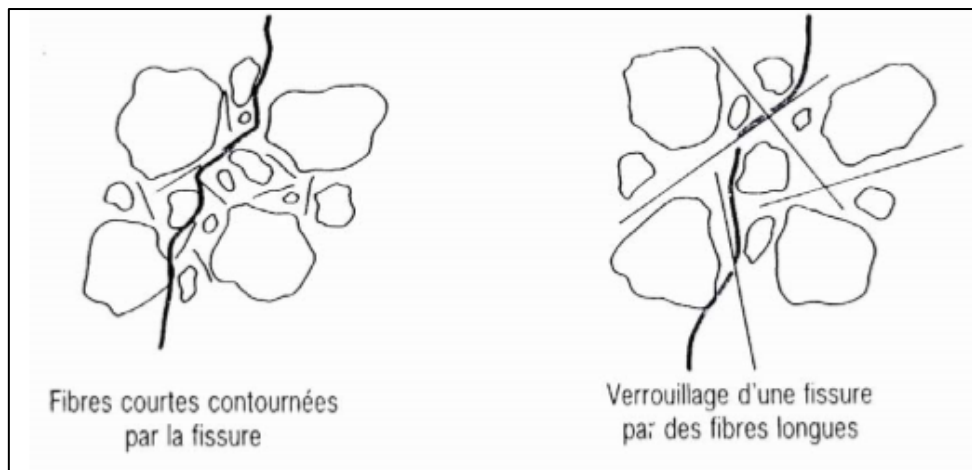


Figure 9:l'effet de l'incorporation des fibres.

2.3- Les caractéristiques des fibres :

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres :

- dimensions (diamètre et longueur).
- formes (fils lisses, crantés, ondulés, etc.).
- résistance mécanique (traction).
- durabilité dans la matrice cimentaire.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons elles doivent avoir une bonne capacité de déformation, c'est-à-dire posséder un module d'élasticité plus élevé que la matrice. Elles doivent être relativement longues et fines, flexibles sans être fragiles pour éviter leur destruction lors du malaxage, faciles à incorporer et sans danger pour la main d'œuvre.

2.4- Domaine d'emploi de différentes fibres :

Les domaines d'emploi des fibres sont multiples. Le choix d'une fibre dépend de la nature de l'ouvrage à réaliser, des possibilités de mise en œuvre, des sollicitations physico-chimiques auxquelles est soumis l'élément. Le tableau suivant résume les domaines d'application des principales fibres utilisées actuellement. Compte tenu de leurs propriétés, les fibres trouvent de nombreuses applications partout où il faut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et améliorer la résistance en traction [11].

Nature de la fibre	Avantage essentiels apportés	Applications principales
Verre	Résistance à la traction. Allègement grâce à la diminution d'épaisseur. Mise en œuvre par moulage ou par projection.	Panneaux divers : sandwiches, habillage, décoratifs. Bardages industriels, Assainissement, Mobilier urbain, Mortiers d'enduits ou de réparation.
Acier	Résistance à la traction et à la flexion Résistance aux chocs, à l'usure Anti fissures Espacement des joints.	<u>Dallages</u> : parking, sols industrielle, chaussées. <u>Elément préfabriqués</u> : tuyaux, caniveaux, abris, garages <u>Bétons projetés en galerie</u> : tunnels, talus. <u>Silos</u> : réservoirs, déversoirs de barrages Constructions anti-explosives
Polypropylène et fibres synthétiques.	Limitation du retrait Maniabilité du béton Résistance aux chocs Aspect de surface.	Dallage, Panneaux préfabriqués décoratifs, Coques minces, Mortiers projetés de réparation, mortiers d'enduits.

Tableau 1: les domaines d'emploi des principales fibres.

Chapitre 03 :

Matériaux utilisés.

Les essais de mon béton fibré ont été réalisés au sein des laboratoires du centre national d'étude et de recherche au service du bâtiment **CNERIB**.

Ou j'ai pu grâce à l'aide des techniciens et des ingénieurs du CNERIB, confectionner mon béton avec certains matériaux cité ci-dessus :

1. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment de dénomination normalisée : CPJ CEM II/A 42.5 © [kg].

C'est-à-dire de classe vraie : 55 MPA.



Figure 10: le ciment utilisé.

2. Granulats :

Les granulats utilisés permettent la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides.

a. Gravier :

Les graviers utilisés sont des graviers 15/25, importé de SETIF.



Figure 11: Gravier 15/25.

b. Gravillon :

Les gravillons utilisés sont des gravillons 8/15, importé de SETIF.



Figure 12: gravillon 8/15.

c. Sable :

Le sable utilisé est un sable importé de SETIF.

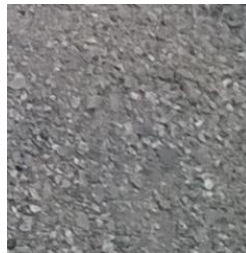


Figure 13: sable utilisé.

3. Adjuvant :

L'adjuvant utilisé « **CHRYSO®XEL TIME 44 Algérie** » est un accélérateur de prise.

Cet adjuvant agit comme catalyseur des réactions initiales d'hydratation des ciments, ainsi la prise est accélérée et les résistances mécaniques se développent rapidement.

Le PV de cet adjuvant est en annexe.

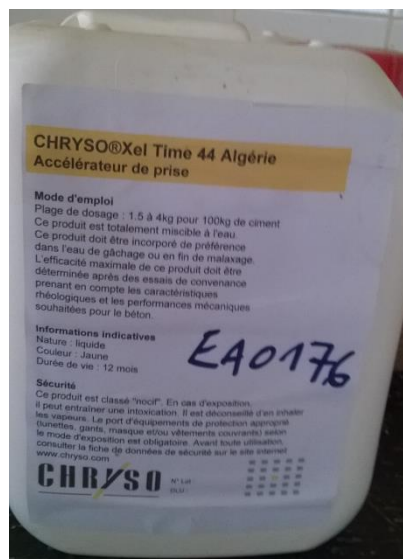


Figure 14: l'adjuvant utilisé.

4. Fibres métalliques :

Les fibres qu'on a utilisées pour nos essais, sont des fibres métalliques de deux types :

- Type 01 : Fibres métalliques, nommées FIBRAL.
- Type 02 : Fibres métalliques, HE++ 75/50 à haute teneur en carbone.

Les fibres métalliques de type 01 « FIBRAL » :

Les FIBRAL sont des fibres métalliques fabriquées localement à base de fil d'acier de diamètre 3,04 mm de provenance d'El-Hadjar (Annaba).



Figure 15: Fibres métalliques, FIBRAL.

Une analyse chimique a été effectuée sur ces fibres, à l'aide d'un spectromètre d'émission étincelle METAL, selon la norme ASTM E1009-95 (2006).

P, phosphore	0,052	Fe, fer	95,915
S, soufre	0,15	Al, aluminium	0,091
C, carbone	0,119	Co, cobalt	0,024
Cu, cuivre	1,266	Si, silicium	0,205
Cr, chrome	0,147	Nb, niobium	0,107
Mn, manganèse	0,68	Zn, zinc	0,008
Mo, molybdène	0,058	Pb, plomb	0,318
Ni, nickel	0,114	Sb, antimoine	0,027
V, vanadium	0,035	Sn, étain	0,033
W, tungstène	0,596	Zr, zircon	0,013
B, bore	0,003	Ti, titane	0,041

Tableau 2: la teneur (%) des éléments chimiques présent dans la fibre "FIBRAL".

Les fibres d'acier testées sont issues de fil étiré à froid, et sont caractérisées par des sections transversales irrégulières, donc selon la norme EN 14889-1 (F), leur résistance à la traction a été déterminée sur le fil et est de l'ordre de 780 Mpa, la détermination des dimensions de ces fibres se fera comme suit :

$$\text{Le diamètre équivalent : } d = \sqrt{\frac{4 \times m \times 10^6}{\pi \times l \times \rho}}$$

Sachant que :

- l : longueur de la fibre (mm).
- d : diamètre équivalent de la poutre.
- ld : longueur développée de la fibre.
- ρ : masse volumique de l'acier doux ($=7850 \text{ Kg/m}^3$).
- m : masse de la fibre (g).

La longueur développée est la longueur de la fibre obtenue après l'avoir redressé avec un marteau.



Figure 16: redressement des fibres.

Grace aux mesures faites au laboratoire, avec un pied-coulisse et une balance, on a pu déterminer les dimensions des fibres :

N° de la fibre	m (g)	l (mm)	ld (mm)	d
1	1	49,85	51,1	1,54
2	1,1	49,88	51,3	1,5
3	0,9	49,17	50,9	1,52
4	0,9	49,16	50,6	1,52
5	1,1	49,51	50,9	1,49
6	1	49,94	51,3	1,52
7	1	50,98	51,4	1,5
8	0,9	50,03	51,1	1,51
9	0,8	49,4	50,03	1,49
10	0,9	49,79	50,3	1,5

Tableau 3: les dimensions des fibres FIBRAL.

Les fibres métalliques de type 02 « HE++ 75/50 » :

Les fibres utilisées sont des fibres **HE++ 75/50** à haute teneur en carbone. Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tiré à froid et se présentent sous forme cylindrique et munies de crochets aux extrémités.



Figure 17: les fibres HE++ 75/50

La longueur de ces fibres est de 50 mm, et leur diamètre 0,75 mm.

La composition chimique de ces fibres est résumée est résumé dans le tableau suivant :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PAF
20,58	4,9	4,7	62,8	0,63	2,28	0,42	1

Tableau 4:compostion chimique des fibres HE ++ 75/50.

Ces fibres ont été testées au laboratoire afin de déterminer leur résistance à la traction qui est de l'ordre 1900 Mpa.

Chapitre 04 :

Formulation et Composition.

1. le béton ordinaire :

La formulation du béton ordinaire a été faite selon la méthode de Dreux-Gorisse, ou après avoir fixé l'affaissement à **13** cm (ouvrage courant) et le diamètre max des granulats à $D_{max} = 25$ mm, le dosage optimal a été obtenu :

- Sable : 720 kg/m^3 .
- Ciment : 350 kg/m^3 .
- Gravillon 8/15 : 380 kg/m^3 .
- Gravier 15/25 : 700 kg/m^3 .
- Eau de gâchage : 190 l/m^3 .
- L'adjuvant (3%) : $10,5 \text{ kg/m}^3$.

2. Le béton fibré :

La formulation du béton fibré a été effectuée de la même manière que celle d'un béton ordinaire avec une petite optimisation selon la méthode de Baron-Lesage [12]:

La méthode de Baron-Lesage est basée sur 03 hypothèses :

- Pour un rapport E/C fixé au départ, le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus maniable.
- Les proportions optimales en granulats dépendent peu de la nature et du volume du liant.
- L'introduction de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

Donc on a :

En 1^{er} : fixer le rapport $E/C = 0,54$.

En 2^{ème} : fixer le diamètre max des granulats $D_{max} = 25$ mm.

En 3^{ème} : déterminer la géométrie et les dimensions des fibres.

En 4^{ème} : Le Dosage des fibres.

- Pour les fibres de types 1, le dosage prescrit est de 25 kg/m^3 .
- Pour les fibres de types 2, le dosage prescrit est de 50 kg/m^3 .

En 5^{ème} : la maniabilité souhaitée. $AF = 13$ cm.

Formulation N°01 :

Béton contenant 25 kg/m³ de fibres métalliques de 50 mm de longueur et de 1,5 mm de diamètre.

Type de fibre :

Il s'agit des fibres FIBRAL ®.

Constituants et composition du BFM :

Les constituants de la matrice :

Constituant	Nature
Ciment	CPJ CEM II/A 42,5 ©
Sable	Silico calcaire concassé 0/5
Granulats	Silico calcaire concassé 8/25
Adjuvant	CHRYSO ® XEL TIME 44-Algerie

Tableau 5: les constituants de la matrice.

La composition :

Constituant	Quantité kg/m ³
Fibres	25
Ciment	350
Eau	190
Adjuvant	10,5
Sable	720
Gravillon	380
Gravier	700

Tableau 6: la composition de notre béton fibré.

Formulation N°02 :

Béton contenant 50 kg/m³ de fibres métalliques de 50 mm de longueur et de 0,75 mm de diamètre.

Type de fibre :

Il s'agit des fibres HE++ 75/50 à haute teneur en carbone.

Constituants et composition du BFM :

Les constituants de la matrice :

Constituant	Nature
Ciment	CPJ CEM II/A 42,5 ©
Sable	Silico calcaire concassé 0/5
Granulats	Silico calcaire concassé 8/25
Adjuvant	CHRYSO ® XEL TIME 44-Algerie

Tableau 7: les constituants de la matrice.

La composition :

Constituant	Quantité kg/m ³
Fibres	50
Ciment	350
Eau	190
Adjuvant	10,5
Sable	720
Gravillon	380
Gravier	700

Tableau 8: la composition de notre béton fibré.

3. Confection des éprouvettes :

Afin de tester la résistance à la compression et la résistance à la flexion de nos bétons fibrés, on a confectionné deux différents types d'éprouvette :

L'essai de compression simple :

Pour ce type d'essai, on a confectionné des éprouvettes cylindriques 15×30 (cm) selon la norme : NF EN 12390-3 de Février 2003.

Pour l'essai de compression, on a réalisé deux types d'éprouvettes :

- Des éprouvettes témoins contenant un béton ordinaire.
- Des éprouvettes contenant un béton fibré. (type 01 et type 02)



Figure 18: confection des éprouvettes 15×30 (cm).

L'essai de flexion :

Pour ce type d'essai, on a confectionné des éprouvettes prismes $7 \times 7 \times 28$ (cm) selon la norme : NF EN 12390-5 d'octobre 2001.

Pour l'essai de flexion, on a réalisé deux types d'éprouvettes :

- Des éprouvettes témoins contenant un béton ordinaire.
- Des éprouvettes contenant un béton fibré.(type 01 et type 02)



Figure 19: confection des éprouvettes $7 \times 7 \times 28$ (cm).

Chapitre 05 :

Essais sur béton frais.

1. L'essai du cône d'Abrams :

Le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé utilisé pour la mesure de la consistance d'un béton frais. Il mesure 20 cm à sa base et 10 cm à son sommet. Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams [13].

L'essai réalisé avec cet appareil est normalisé selon la norme NF EN 12350-2, désigné par essai de consistance ou plus généralement par essai d'affaissement au cône d'Abrams il détermine la plasticité du béton.



Figure 20: détermination de l'affaissement avec le cône d'Abrams.

2. L'essai sur béton témoin :

On a effectué l'essai sur le béton témoin, et on a obtenu un affaissement de 13 cm.



Figure 21: l'affaissement d'un béton témoin.

3. L'essai sur béton fibré :

On a effectué l'essai sur le béton fibré type 01, et on a obtenu un affaissement de 11 cm.

Et sur le béton fibré type 02, on a obtenu un affaissement de 10 cm.

➔ L'affaissement est entre 10 et 15 cm donc notre béton est très plastique.

Chapitre 06 :

Essais sur béton durcis.

1. Essai de compression :

Cet essai nous permis de déterminer la résistance à la compression du béton durci c'est-à-dire à 14 jours (grâce à l'utilisation d'un accélérateur de prise).

Le principe de cet essai est de chargé les éprouvettes jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.



Figure 22: la machine pour essai de compression.

Préparation des éprouvettes :

Pour cet essai on a confectionné des éprouvettes cylindriques 15x30 (cm) conforme à la norme, ces éprouvettes vont ensuite subir un surfaçage au mortier de soufre, afin d'ajuster leurs extrémités.



Figure 23: surfaçage des éprouvettes.



Figure 24: vérification de la conformité aux normes des éprouvettes.

Sélection de la vitesse de chargement constante de la machine :

La vitesse de chargement constante de la machine est déterminée en fonction du diamètre de l'éprouvette.

D (mm)	Surface brute (mm ²)	Vitesse 0,2 à 1 Mpa/s	Vitesse KN/s
150	17663	0,6	10,6

Tableau 9: les caractéristiques de la machine.

2. L'essai de flexion :

Le principe de cet essai est de soumettre des éprouvettes prismatiques 7x7x28 (cm) jusqu'à rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance en flexion est calculée.



Figure 25: la machine de l'essai de flexion.

Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 12390-5 d'octobre 2001. (Voir l'annexe)

Chapitre 07 :

Résultats et discussions.

1. L'essai de compression :

Les résistances à la compression obtenues des essais de compression précédemment décrit :

	Eprouvette 01	Eprouvette 02	Eprouvette 03
Béton témoin	18.62 Mpa	17.71 Mpa	17.54 Mpa
Béton fibré type 01	18.40 Mpa	18.54 Mpa	17.84 Mpa
Béton fibré type 02	19.30 Mpa	18.89 Mpa	19.43 Mpa

Tableau 10: les résistances à la compression obtenues à 14 jours.

On remarque que les bétons fibrés et les bétons ordinaire ont quasiment les mêmes résistances à la compression, on peut donc dire que les fibres métalliques qu'on a utilisées (avec le dosage qu'on a utilisées) n'interviennent pas à la résistance en compression du béton.

2. L'essai de flexion :

Les résistances à la flexion obtenues des essais de flexion précédemment décrit :

	Eprouvette 01	Eprouvette 02	Eprouvette 03	Eprouvette 04	Eprouvette 05	Eprouvette 06
Béton témoin	3,61 KN	3,64 KN	3,71 KN	3,67 KN	3,85 KN	3,57 KN
Béton fibré type 01	4,20 KN	4,36 KN	4,32 KN	4,28 KN	5,12 KN	4,63 KN
Béton fibré type 02	6,45 KN	6,32 KN	6,53 KN	6,57 KN	6,34 KN	6,42 KN

Tableau 11: l'effort max obtenus des essais de résistance à la flexion à 14 jours.

On remarque que le béton fibré résiste beaucoup mieux à la flexion qu'un béton ordinaire, et donc les fibres métalliques qu'on a introduites jouent un rôle important dans la résistance à la flexion du béton.

Les courbes effort/déformation :

L'essai de flexion ainsi réalisé nous a aussi permis d'obtenir des courbes qui caractérise le béton, ces courbes sont dit : courbes effort déformation :

Courbe effort/déformation du béton témoin :

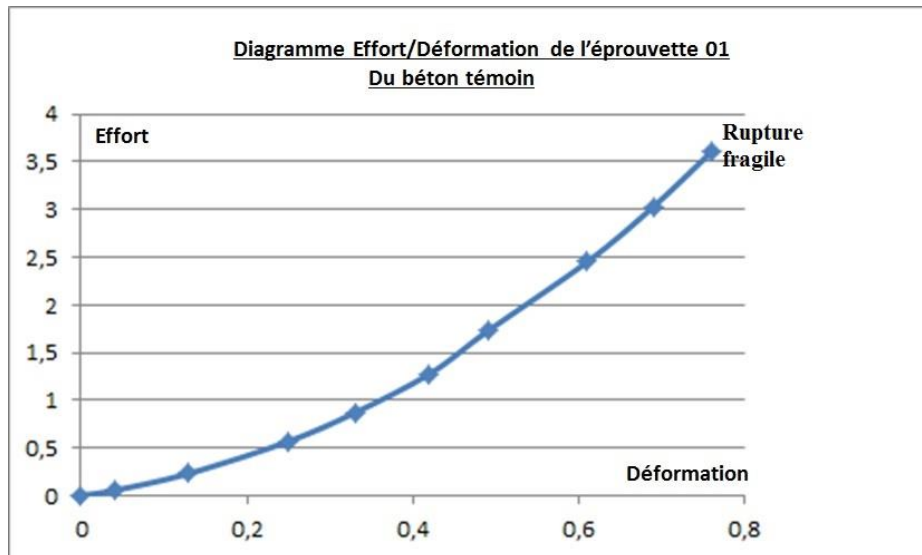


Figure 26: courbe effort/déformation du béton ordinaire.

On remarque de cette courbe qu'arriver à un certain effort notre éprouvette prismatique de béton ordinaire subit une rupture brutale et directe permettant une déformation de l'ordre de 0,7 mm.



Figure 27: l'éprouvette du béton témoin après rupture (CNERIB-ALGER).

Courbe effort/déformation du béton fibré type 01 :

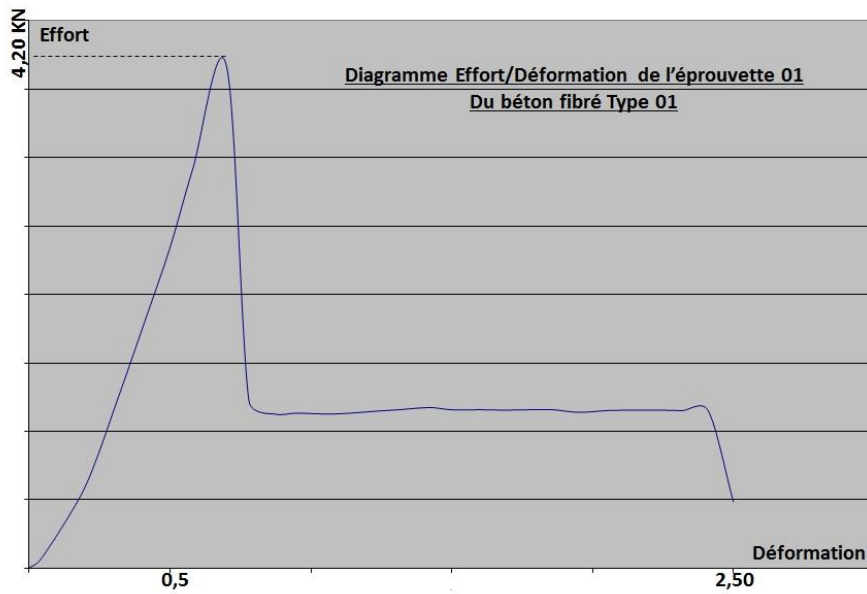


Figure 28: courbe effort/Déformation du béton fibré type 01.

On remarque de cette courbe qu'arriver à un certain effort notre éprouvette prismatique de béton fibré type 01 subit une 1ere micro fissuration, mais continue à résister jusqu'à une rupture définitive après une déformation de l'ordre de 02,50 mm.

Courbe effort/déformation du béton fibré type 02 :

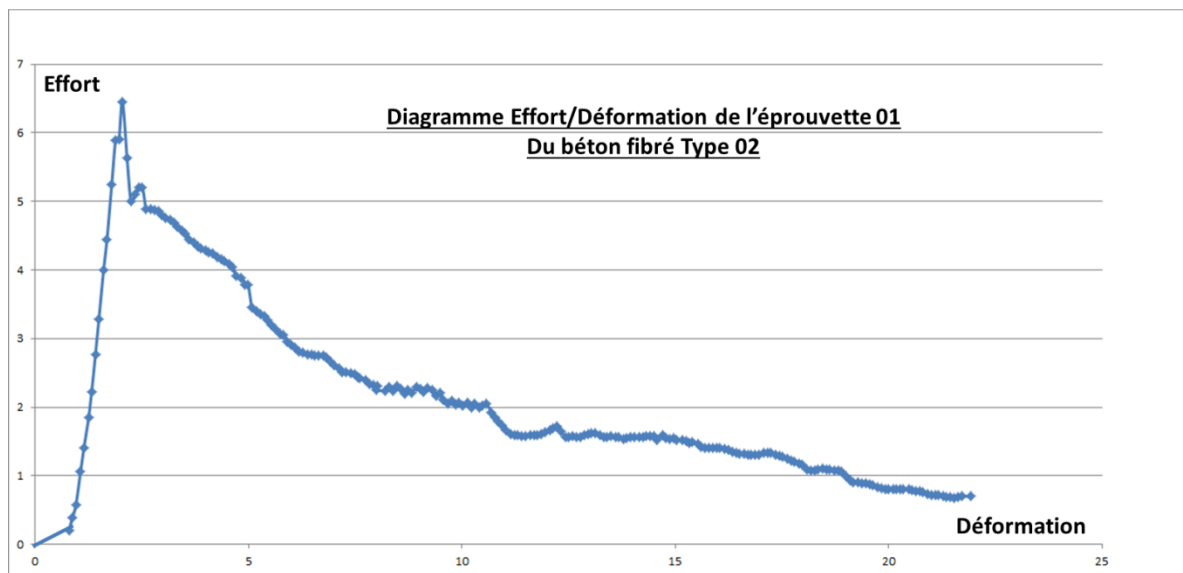


Figure 29: courbe effort/déformation du béton fibré type 02.

On remarque de cette courbe qu'arriver à un certain effort notre éprouvette prismatique de béton fibré type 02 subit une 1ere micro fissuration, mais continue à résister jusqu'à une rupture définitive après une déformation de l'ordre de 22,50 mm.



Figure 30: L'éprouvette du béton fibré type 02 après rupture (CNERIB-ALGER).

Comparaison entre béton ordinaire et fibré:

On remarque que l'introduction des fibres dans le béton, lui a permis d'avoir une meilleure résistance à la flexion, ces fibres ont aussi permis au béton une plus grande ductilité.

On peut donc dire que la fibre métallique permet de couder le béton luttant ainsi contre l'apparition de fissures.

Comparaison entre béton fibré type 01 et type 02:

On a vu précédemment que le béton fibré type 01 est moins performant que le béton fibré type 02, et cela peut s'expliquer par :

- Un plus grand dosage de fibre dans le béton type 02 (50 kg/m^3) que dans le type 01 (25 kg/m^3).
- Le rapport diamètre de la fibre sur sa longueur est plus petit dans le béton type 02 ($0,75/50$) que dans le béton type 01 ($1,5/50$).

Chapitre 08 : Conclusions.

Cette étude au laboratoire du « CNERIB », le centre national d'étude et de recherche intégré au bâtiment, nous a permis de mettre en évidence des propriétés essentielles du comportement mécanique des bétons renforcés par des fibres métalliques.

Ces propriétés essentielles sont entre autre :

L'augmentation de la ductilité.

L'augmentation de la résistance à la flexion.

L'augmentation de la résistance à la traction.

Une meilleure résistance à la fatigue.

Une meilleure résistance aux chocs.

Cette étude nous a aussi permis de démontrer que ces propriétés mécaniques dépendent d'une part de la matrice, mais dépendent aussi de la géométrie des fibres métallique et surtout de leur teneur.

Pour conclure de façon simple on peut dire que le béton de fibre métallique est un béton armé à l'échelle locale, Il faut savoir que comme les armatures traditionnelles de béton armé, les fibres ont pour objectif de maîtriser la fissuration.

Cependant il existe une relation intime entre les fibres et les fissures. A la différence du béton armé où les armatures sont placées dans le coffrage avant le bétonnage, les fibres métalliques sont mélangées avec les autres constituants du béton pour former un matériau spécifique appelé le béton de fibres. Et du fait du mélange des fibres à l'intérieur de la matrice, ces dernières sont obligatoirement courtes et impliquent l'aspect local évoqué précédemment. La petite taille des fibres va avoir un effet sur l'échelle à laquelle elles interviennent à l'intérieur du matériau. Comme les fibres métalliques jouent le même rôle que les armatures traditionnelles en ce qui concerne la fissuration, on peut remplacer ces armatures soit en totalité soit partiellement par les fibres. Pour les architectes, cette perspective peut offrir une grande liberté, car il est possible de passer de formes contraignantes liées aux armatures, à des formes beaucoup plus libres.

Bibliographie :

- [1] Aboudaka.D et Sal.S ; « Le béton de fibres » ; projet de fin d'étude proposé par Dr.Fedghouche Ferhat ; ENTP, Kouba, Alger, 1997.
- [2] Aboudaka.D et Sal.S ; « Le béton de fibres » ; projet de fin d'étude proposé par Dr.Fedghouche Ferhat ; ENTP, Kouba, Alger, 1997.
- [3] Le site internet « wikipédia.org ».
- [4] Gorisse-Dreux ; « Nouveau guide du béton » ; Editions Eyrolles Paris.
- [5] Le site internet « wikipédia.org ».
- [6] La collection technique ; « les bétons aux nouvelles performances », chapitre 03.
- [7] Rossi.P ; 1998 ; « les bétons de fibres métalliques » ; presse de l'ENPC.
- [8] La collection technique ; « les bétons aux nouvelles performances », chapitre 03.
- [9] Rossi.P ; 1998 ; « les bétons de fibres métalliques » ; presse de l'ENPC.
- [10] Le site internet « wikipédia.org ».

Annexe 01 :
Le PV de l'adjuvant.

Annexe 02 :
Norme de l'essai de
compression.

Annexe 03 :
Norme de l'essai de
flexion.