

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGUERRA BOUMERDES



UNIVERSITE  
DE BOUMERDES

UNIVERSITE DE BOUMERDES  
FACULTE DES SCIENCES  
DE L'INGENIEUR.  
DEPARTEMENT DE GENIE DES  
MATERIAUX  
LABORATOIRE DES MATERIAUX  
MINERAUX ET COMPOSITES  
(LMMC)



## MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX

Option : Physique et Mécanique des Matériaux

Présenté par :

M<sup>lle</sup> : GUECIOUER DJAMILA

## THEME

**Caractérisation expérimentale d'un  
Béton de structure composite hybride**

Soutenu publiquement le :

devant le jury composé de :

Pr. ABADLIA.M.

Professeur. Université de Boumerdès.

Président

Dr. AIT TAHAR.K.

Maître de conférences. Université de Tizi Ouzou.

Rapporteur

Pr. BOUAFIA .Y

Professeur. Université de Tizi Ouzou.

Examineur

Pr BEZZAZI .B

Professeur. Université de Boumerdès.

Examineur

Dr. MEDDAHI.A.

Maître de conférences. Université de Boumerdès.

Examineur

Boumerdès 2006

# Remerciements

**Je remercie d'abord « Allah » sans lequel, ce travail n'aurait pas été réalisé.**

**Je tiens à présenter mes respectueux remerciements à mon promoteur Monsieur Ait Tahar.K pour son aide considérable, ses conseils, sa participation active à la préparation de ce travail.**

**Mes remerciements particuliers et sincères vont à Messieurs Ghernoutit, Benlkoraichi, Bellel, Aiba, Meddahi, Meziane, Berdioui pour leurs conseils judicieux, leurs aides et leurs soutiens précieux.**

**Je remercie tout les membres de jury de m'avoir honoré en acceptant de juger mon travail.**

**Dans l'impossibilité de donner une liste nominative ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire, trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.**

**En fin, je rends hommage à ma mère pour le soutien qu'elle m'a apporté durant toute mes années d'étude.**

# **DEDICACES**

Je dédie ce travail à :

- La mémoire de mon père .
- Ma mère qui a consacré tant de moyen pour mes études.
- Mes frères Djillali et Rachid.
- Mes sœurs en particulier Hayet.
- Mes nièces et mes neveux.
- Mes beaux frères et mes belles sœurs.
- Tous mes amies (is) et à toute la promotion.

## **RESUME**

Cette étude a pour but essentiel de formuler et par la suite caractériser le comportement mécanique jusqu'à rupture des bétons composites hybrides à renforts combiné en fibres de verres et métalliques.

L'intérêt de la combinaison des renforts très ductiles, réside dans la possibilité de conjugaison des performances mécaniques de chacun d'eux. Une fois, les performances sont conjuguées, un apport non négligeable de ductilité est conféré à la matrice béton, dont la résistance en traction est très faible. Le mode de rupture des bétons composites devient alors ductile.

Les différents résultats obtenus par les essais d'écrasement de flexion quatre points et de compression centrée sur les éprouvettes conçues, ont confirmés tout l'intérêt de cette incorporation de fibres hybrides dans la matrice béton en teneur limitée dans le retour de ductilité.

Une très bonne concordance des résultats théoriques obtenus par application du modèle proposé, de calcul des contraintes dans le béton composite avec ceux obtenus expérimentalement, a été observée.

**Mots clés :** béton composite, hybride, comportement mécanique, homogénéisation, essais, Rupture, modélisation

## **ABSTRACT**

The purpose of this study is essential to formulate and thereafter characterize mechanical behavior until failure of the hybrid with reinforcements combined out of glass and metal fiber composites concretes.

The interest of the combination of the very ductile reinforcements lies in the possibility of conjugation of the mechanical performances of each one of them. Once, the performances are combined, a considerable contribution of ductility is conferred on the matrix concrete, whose resistance in traction is very low. The mode of cracking of the composites concretes becomes ductile then.

The various results obtained by the compression tests of inflection four points and compression centered on the designed test-tubes, confirmed all the interest of this incorporation of hybrid fibers in the matrix concrete in content limited in the return of ductility.

A very good agreement of the theoretical results obtained by application of the model suggested, of calculation of the constraints in the composite concrete with those obtained in experiments, was observed.

**Keywords:** Concrete composite, hybrid, mechanical behavior, homogenization, tests, failure, modeling.

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو أولا متابعة التغيرات الميكانيكية حتى التصدع لخراسنة هجينة مركبة من دعامتين ( خيط الزجاج وخيط معدني ) الهدف من ازدواج الدعامتين اللينتين جدا ؛ يختصر في القدرة على تضافر الخصائص الميكانيكية المتميزة لكل واحد منهما .مما أضاف للخراسنة صلابة لا باس بها رغم أن هذه الأخيرة متميزة بقدرة شد ضعيفة جدا .  
مختلف النتائج المتحصل عليها من خلال تجارب التحطيم للالتواء أربع نقط و كذا للضغط المركزي على العينات المصممة ؛ أكدت الهدف من إضافة هذه الخيوط المزدوجة لقالب خرسانة و المتمثلة في الصلابة .  
مطابقة جيدة لاحظناها من خلال النتائج النظرية المتحصل عليها من خلال تطبيق نموذج مقترح لحساب إجهاد الخرسانة المركبة مع النتائج المتحصل عليها تطبيقيا .

**مفتاح الكلمة :** خرسانة مركبة - هجينة - خصائص ميكانيكية - تجانس - تجارب - التحطيم - نموذجية

## LISTE DES FIGURES

Désignation	Titre	Page
Figure.I.1	Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement	6
Figure.I.2	Compatibilité des mortiers en fonction de leur teneur en fibres d'acier et de leur élanement	7
Figure I.3	Verrouillage de la fissure	13
Figure.I.4	Ouvrabilité en fonction de $V_f$ et du rapport $l/d$	14
Figure.I.5	Ouvrabilité en fonction de $V_f$ et $D_{max}$ ( $l/d = 100$ )	15
Figure.I.6	Détermination du rapport S/G optimal	18
Figure.I.7	Maniabilimètre à béton lcl [25 ]	20
Figure II.1	Type de fibres de verre utilisées	35
Figure II.2	Fibres d'aciers utilisés	37
Figure II.3	Mesure de l'affaissement à l'aide du Cône d'ABRAMS	43
Figure II.4	Affaissement au cône d'abrams pour chaque composition	44
Figure II.5	Malaxage du béton	45
Figure II.6	Séquences de préparation du béton composite	47
Figure II.7	Remplissage béton dans les moules	48
Figure II.8	Béton composite BCI (1 % $F_v$ + 1 % $F_a$ )	49
Figure II.9	Béton composite BCII (1,5 % $F_v$ + 1,5 % $F_a$ ) .	49
Figure III.1	Dispositif de chargement	52
Figure III.2	Machine d'essai	53
Figure III.3a	Rupture du béton témoin	54
Figure III.3b	Structure interne	54
Figure III.4	Mode de rupture ductile	54
Figure III.5	Densification de fissures et rupture ductile	55
Figure III.6	Diagramme force – flèche selon la composition	57
Figure III.7	Flèche à la rupture selon la composition	58
Figure III.8	Force de rupture selon la composition	58
Figure III.19	Variation de la contrainte à la flexion selon la composition	58
Figure III.10	Bâti de compression	59
Figure III.11a	Rectification des faces	60
Figure III.11b	Collage de la jauge	60
Figure III.12	Mode d'essai et rupture de l'éprouvette	60
Figure III.13	Diagramme force – flèche pour les différents types de béton	63
Figure III.14	Variation de la force de rupture la compression selon la composition	63
Figure III.15	Variation de la flèche à la rupture selon la composition	63
Figure III.16	Variation de la contrainte selon la composition	63

Figure IV.1	Schéma simplifié d'une traction longitudinale	67
Figure IV.2	Lois de comportement du composite unidirectionnel soumis à une traction Longitudinale	68
Figure IV.3	Lois de comportement des constituants Cas d'un composite avec un seul renfort	70
Figure IV.4	Lois de comportement des composites Cas d'un composite hybride avec 'i' renforts	71
Figure IV.5	Matériau composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale	71
Figure IV.6.a	Confrontation des résultats de flexion 1 <sup>ère</sup> approche	75
Figure IV.6.b	Confrontation des résultats de compression 1 <sup>ère</sup> approche	75
Figure IV.7.a	Confrontation des résultats de flexion 2 <sup>ème</sup> approche	78
Figure IV.7.b	Confrontation des résultats de compression 2 <sup>ème</sup> approche	78

## LISTE DES TABLEAUX

Désignation	Titre	Page
Tableau I.1.	Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres	9
Tableau I.2.	Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de Ciment	10
Tableau I.3.	Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés	11
Tableau I.4	Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés	12
Tableau II.1	Analyse granulométrique du sable : NF P18.560	29
Tableau II.2	Équivalent de sable	29
Tableau II.3	Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau	30
Tableau II.4	Composition chimique du sable utilisé	30
Tableau II.5	Analyse granulométrique du gravier 8/15: NF P18.56	31
Tableau II.6	Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau	31
Tableau II.7	Composition chimique du gravier utilisé	32
Tableau II.8	Résultats des essais physiques sur ciment	33
Tableau II.9	Résultats des essais mécaniques sur ciment	33
Tableau II.10	Résultats de l'analyse chimique de ciment.	34
Tableau II.11	Compositions chimiques de fibres de verre	35
Tableau II.12	Caractéristique mécanique de fibre de verre (AR)	36
Tableau II.13	Caractéristique géométrique – physique et mécanique de la fibre d'acier	37
Tableau II.14	Composition calculée en fonction des différents rapports S / G	42
Tableau II.15	Affaissement en fonction du rapport S / G	43
Tableau II.16	Poids des fibres incorporées	44
Tableau II.17	Indexation des éprouvettes	48
Tableau II.18	Affaissement au cône d'Abrams	48
Tableau III.1	Résultats effort- flèche des différents types de bétons	56
Tableau III.2	Essai de flexion à 04 points sur béton témoin	56
Tableau III.3	Essai de flexion à 04 points sur béton composite BCI	56
Tableau III.4	Essai de flexion à 04 points sur béton composite BCII	57
Tableau III.5	Force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton	57

Tableau III.6	Résultats effort - déplacement longitudinal des différents bétons	61
Tableau III.7	Résultats obtenus pour béton témoin	61
Tableau III.8	Résultats obtenus pour béton composite BCI	62
Tableau III.9	Résultats obtenus pour béton composite BCII	62
Tableau III.10	Force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton	62
Tableau IV.1	Caractéristiques mécaniques des fibres de renfort et de la matrice béton	74
Tableau IV.2	Résultats du calcul	74
Tableau IV.3	Résultats du calcul	77

# Tables des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1- INTRODUCTION .....	4
I.2- Définition : apport des fibres.....	5
I.2.1. Définition.....	5
I.2.2. Apport des fibres.....	6
I.3- les constituants du béton de fibres .....	7
I. 4- Types de composites.....	8
I.5- Rôles des fibres.....	9
I.6. Propriétés du matériau béton composite.....	11
I.7. Notion d'ouvrabilité d'un béton de fibres .....	14
I.7.1. Longueur des fibres.....	14
I.7.2. Dimensions du plus gros granulats et pourcentage max en fibres.....	15
I.7.3. Facteurs influençant la rhéologie du béton frais.....	15
I.8. Mise en œuvre des bétons de fibres.....	17
I.9- Formulation des bétons de fibres.....	18
I.9.1. Description de la méthode.....	19
I.9.2- Méthode de composition des bétons de fibres.....	20
I.10. Comportement mécanique de béton de fibres.....	22
I.10.1. Résistance à la traction par flexion.....	22
I.10.2. Résistance à la compression.....	23
I.10.3. Influence du pourcentage de fibres type de fibres sur le.....	23
Comportement mécanique de BAF	
I.11. Les applications pratiques des bétons de fibres.....	24
I.11.1. Les dalles.....	24
I.11.2. Les résurfacages.....	25
I.11.3. Fondation de machines.....	25
I.11.4. Fondations profondes.....	25
I.11.5. Construction hydraulique.....	26

I.11.6. remplacement ou addition des fibres aux armatures transversales.....	26
I.12. Conclusion du chapitre.....	27

## **Chapitre II. FORMULATION ET ELABORATION D'ÉPROUVETTES D'ESSAIS**

II.1. Différents essais sur les constituants de béton composite.....	29
II.1.1. Généralités .....	29
II.1.2. Matériaux utilisés.....	29
II.1.2.1. Analyse granulométrique du sable.....	30
II.1.2.2. Equivalent de sable.....	30
II.1.2.3. Résultats des essais physiques sur le sable.....	31
II.1.2.4. Analyse chimique du sable.....	31
II.1.2.5. Analyse granulométrique du gravier.....	32
II.1.2.6. Résultats des essais physiques sur le gravier.....	32
II.1.2.6.1. Analyse chimique de gravier.....	33
II.1.2.7. Ciment.....	33
II.1.2.7.1. Résultats des essais physiques sur le ciment.....	33
II.1.2.7.2. Résultats des essais mécaniques sur le ciment.....	34
II.1.2.7.3. Résultats d'analyses chimiques sur le ciment.....	35
II.1.2.8.. Fibre de verre.....	35
II.1.2.8.1. Historique.....	35
II.1.2.8.2. Propriétés de fibre de verre.....	36
II.1.2.8.2.1. composition chimique.....	36
II.1.2.8.2. 2.Proprietes physiques et chimiques.....	37
II.1.2.8.2.3. Propriétés mécaniques.....	37
II.1.2.9. Fibres d'acier.....	37
II.1.2.9.1. Nature des fibres d'aciers utilisées.....	37
II.1.2.9.2. Les caractéristiques de fibres d'aciers utilisées.....	38
II.2. Préparation des éprouvettes.....	39
II.2.1. Introduction.....	39
II.2.2. Méthode de composition adoptée.....	40
II.2.2.1. Formulation du béton selon Baron lesage.....	40

II.2.2.2. Etapes de calcul.....	40
II.2.2.3. Exemple de calcul.....	42
II.2.3. Différentes mesures.....	44
II.2.3.1. Mesure de l'ouvrabilité.....	44
II.2.3.2. Poids des fibres incorporées.....	45
II.2.4. Procédure de malaxage.....	46
II.2.4.1. Caractéristique propre du malaxeur.....	46
II.2.4.2. Séquence de malaxage.....	46
II.2.5. Procédure de préparation des éprouvettes.....	47
II.2.5.1. Séquences de préparation.....	47
II.2.5.2. Affaissement en fonction du type de béton.....	49
II.2.5.3. Types d'éprouvettes réalisées.....	51
II.2.6. Conclusion du chapitre.....	52

### **Chapitre III. ANALYSE EXPERIMENTALE DU MODE DE COMPORTEMENT DES BETONS COMPOSITES**

III.1- Introduction.....	53
III.2. Essais mécaniques.....	53
III.2.1. Essai de résistance à la traction par flexion.....	53
III.2.1.1. Eprouvettes soumises à l'essai après 28j de coulage.....	54
III.2.1.2. Mode de rupture par flexion selon la composition.....	54
III.2.1.2. 1. Cas du béton témoin.....	54
III.2.1.2.1.2. Cas du béton composite à renfort combiné BCI.....	55
III.2.1.2.3. Cas du béton composite à renfort combiné BCII.....	56
III.2.1.2.4. Résultats des essais selon la composition .....	57
III.2.2. Essai de résistance à la compression.....	60
III.2.2.1. Préparation des éprouvettes d'essai.....	61
III.2.2.2. Résultats des essais selon la composition.....	63
III.3. Analyse des résultats et conclusion.....	66

## **Chapitre IV. MODELISATION DU COMPORTEMENT A LA RUPTURE DU BETON COMPOSITE.**

IV.1. Introduction .....	68
IV.2. Modélisation d'un matériau composite.....	68
IV.2.1. Notion du volume élémentaire représentatif.....	69
IV.3. Modélisation des constantes élastiques d'un béton composite hybride.....	72
IV.3.1. Modélisation de la contrainte développée dans un composite soumis A une traction longitudinale.....	74
IV.3.1.1. Expressions de la contrainte selon la nombre de renforts.....	74
IV.3.1.2. Application numérique.....	78
IV.4. Conclusion du chapitre .....	80
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>84</b>

## **INTRODUCTION GENERALE**

La technologie de la construction ne cesse toutefois de progresser et avec elle le potentiel de performances, d'adéquation aux besoins et de rapidité de réalisation des ouvrages.

Dans la conception d'un béton composite le but est de rechercher des performances telles que : une résistance et un module élevé, une masse volumique faible et un coût moins prohibitif, selon la destination mécanique.

L'étude du comportement mécanique d'un béton composite passe généralement par l'utilisation du concept d'homogénéisation. L'hypothèse essentielle est celle de la continuité.

La formulation d'un béton composite est tributaire du choix des fibres de renfort à utiliser dans la matrice béton pour répondre aux exigences d'exploitation pratique du matériau conçu.

L'amélioration des résistances du béton en particulier à sa résistance en traction et généralement le but recherché. Là, beaucoup d'auteurs ont étudiés et élucidés cette question, parmi les différentes formulations nous citerons celle qui consiste à incorporer des fibres de grande résistance (métalliques, verre, etc.) qui a donné naissance aux bétons de fibres.

La modélisation d'un matériau est un moyen de transcrire son comportement et les lois qui le régit. Il existe de nombreuses possibilités de modélisation qu'elle soit analytique, numérique, rhéologique, statistique et autres. La rupture d'un matériau est fortement liée à l'hétérogénéité locale. Le mode de rupture est fonction de l'énergie développée par la structure elle-même fonction des performances de ses constituants intrinsèques.

Le but de notre travail est de modifier le mode de rupture fragile des bétons ordinaires en mode plus ductile en formulant un béton composite à ajout combiné de fibres de nature différentes mais présentant une certaine compatibilité du travail mécanique, de faible résistance, en teneur réduites.

Cette étude est présentée comme suit :

- Le chapitre I est consacré à l'étude bibliographique sur les bétons de fibres.

Dans ce chapitre on a présenté de façon générale la technologie du béton renforcé de fibres, les différentes fibres utilisées dans le renforcement de béton, les méthodes de formulation, le comportement mécanique des bétons de fibres vis-à-vis des sollicitations .et en fin les applications potentielles de ces bétons.

La synthèse de cette recherche bibliographique, nous a permis de s'intéresser au mode de comportement des bétons composites à base d'ajout hybride de fibres, dans le but d'améliorer son comportement jusqu'à rupture. Nous considérons que l'ajout de fibres de nature différentes mais présentant une certaine compatibilité du travail mécanique en quantités minimales, et présentant une faible résistance permettra sans aucun doute d'assurer un certain retour de rigidité ; ce qui évitera la rupture fragile des éléments de structure.

- Dans le chapitre II, 'Formulation et Elaboration d'éprouvettes d'essais'

Dans cette étude expérimentale d'élaboration et de préparation des éprouvettes d'essais, on s'est intéressé dans la première partie à l'identification physique, chimique et mécanique des différents constituants du béton composite.

Cette identification a permis de déterminer les propriétés intrinsèques à savoir : la distribution granulaire, l'équivalent du sable, le retrait, la nature des fibres.

Dans la deuxième partie, une élaboration est menée sur des éprouvettes en béton avec des fibres d'acier et de verre, nous avons fait varier le pourcentage en volume (1% et 1,5%). Les différentes éprouvettes élaborées seront soumis à des essais de caractérisation du comportement mécanique en compression centrée et en flexion quatre points, dans le but de mettre en exergue l'intérêt de l'incorporation de fibres combinées dans la matrice béton pour améliorer son mode de déformation et par conséquent son mode de rupture.

- Dans le chapitre III, 'Analyse expérimentale du mode de comportement des bétons composites'

Pour décrire et caractériser le mode de comportement mécanique des bétons composites, les différentes éprouvettes réalisées ont été soumises aux différents essais mécaniques et en particulier les essais de flexion quatre points et de compression centrée. Les essais ont été menés au niveau du laboratoire LMMC de Boumerdes et au niveau du CETIM- Boumerdes.

Notre approche conceptuelle qui a porté sur l'amélioration du mode de rupture fragile du béton ordinaire en lui conférant une plus grande ductilité, à travers le contrôle des mécanismes de fissuration est largement vérifiée expérimentalement.

Dans le chapitre IV, 'Modélisation du comportement à la rupture du béton composite'

Après avoir rappelé le principe de la modélisation d'un matériau composite et les différentes approches des modèles de modélisation théorique telles que la notion du volume élémentaire représentatif, les constantes élastiques pour un béton composite hybride, nous nous sommes intéressé à un modèle de détermination de la contrainte développée dans un béton composite hybride soumis à une traction longitudinale. Les différents résultats de l'application de la loi régissant le mode de rupture sont confrontés aux résultats obtenus expérimentalement.

Enfin une conclusion générale termine cette étude

# Chapitre I. Recherche bibliographique

## I.1. Introduction

Depuis que le matériau béton existe, les ingénieurs ont toujours cherché à améliorer ses performances et à combattre ses défauts. Parmi ceux-ci le principal est sans doute sa fissurabilité et par voie de conséquence sa résistance à la traction. [1]

Le béton est un matériau fissurable de nature et résiste mal à la traction. L'ajout de fibres au béton est une des solutions qui permis de contrecarrer la propagation rapide des fissures. Les fibres, des éléments discontinus, dispersées aléatoirement ou pas dans le béton peuvent par un effet de couture, empêcher ou retarder l'apparition de fissuration. [2]

Les causes de la fissuration du béton sont multiples. En tant que matériau, il est lui-même source d'amorces de ruptures [3]. Les actions mécaniques, thermiques et hygrométriques extérieures provoquent également des microfissures, jugées normales, et généralement limitées réglementairement pour avoir une bonne tenue dans le temps des structures.

Dans ce contexte, on comprend que la présence des fibres, ayant la possibilité de gêner l'évolution, sous sollicitations thermo-mécaniques ou hygrométriques, de microfissures préexistantes.

Il faut néanmoins garder une certaine réserve aussi bien quant à la transposition directe de l'utilisation des "résistances mécaniques" et des essais correspondants qu'à la reconduction de formules de composition [4]. Contrairement aux idées reçues, il ne suffit pas d'introduire de fibres dans un béton réputé "performant" pour avoir un excellent matériau fibré.

- Pour être efficaces, les fibres doivent être bien ancrées, elles posséderont alors des longueurs suffisantes ou bien des formes adaptées, et la matrice elle-même devra être performante.

- Pour couvrir toutes les micro-fissures existantes, ou susceptibles de se développer au sein du matériau, elles doivent être nombreuses et bien réparties pour conserver l'homogénéité du composite.

Le béton fibré doit être un matériau ouvrable, capable d'occuper un volume donné, compte tenu de la technique de mise en œuvre tout en conservant une certaine homogénéité.

L'utilisation de béton de fibres dans l'industrie en général et dans le domaine des travaux publics et bâtiment en particulier ces dernières années et en progression. Actuellement, on utilise ce matériau dans la fabrication des dallages industriels, dans le renforcement des tunnels par le béton projeté et dernièrement, on a commencé à utiliser ce matériau dans le domaine des grands ouvrages d'art et en particulier pour les ponts en encorbellement successifs de grandes portées et au niveau des intrados des passages supérieurs pour lutter contre les chocs, il est utilisé aussi pour le coulage des pieux forés.

En général, les fibres se sont imposées pour des raisons technologiques liées à la difficulté de mise en place des armatures transversales traditionnelles, en tenant en compte de la bonne répartition des fibres (évitant le phénomène d'hérissou) et garantissant un bon bétonnage.[5]

## **I.2. Définition : apport des fibres**

### **I.2.1. Définition**

Un matériau composite est un solide polyphasé dans lequel deux ou plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'atteindre [35].

D'un point de vue général et simplifié, les composites bétons armés de fibres sont constitués des trois phases suivantes :

- la matrice cimentaire,

- les fibres de renfort,
- les zones de transition (interfaces) fibres matrice.

La diversité des composites ciments armés de fibres est essentiellement due à la variabilité du renfort fibreux. Ce dernier peut être différencié selon :

- son aspect géométrique : fibres courtes, longues, droites, ondulées, avec crochets, alignées, d'orientation quelconque, etc.
- le type de matériau constitutif: fibres polymériques, naturelles, métalliques, de verre,

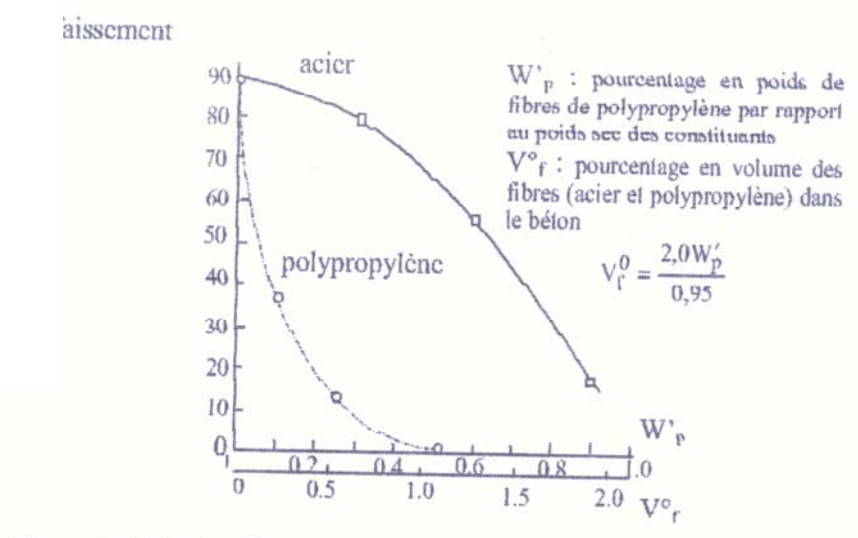
### I.2.2. Apport des fibres

L'ajout des fibres à la matrice cimentaire permet d'obtenir [36]:

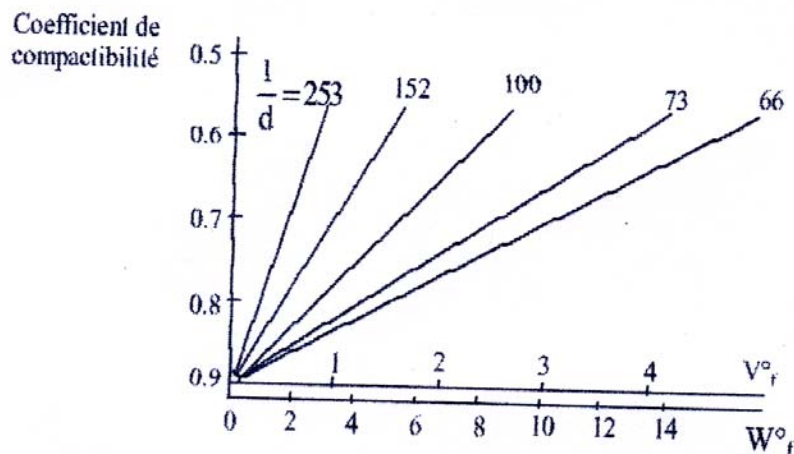
- une meilleure résistance à la traction, la flexion, la fatigue, l'abrasion et au choc ;
- une meilleure maîtrise de la rupture du matériau (amélioration de la ductilité) ;
- l'atténuation des effets thermiques et de retrait ;
- l'amélioration du comportement du matériau au jeune âge...

L'ajout des fibres au liant hydraulique peut susciter des effets tels que :

- la baisse de maniabilité [37];
- la formation d'oursins de fibres [37] ;
- la coupure des fibres lors du malaxage [38];
- l'abrasion des fibres.



**Figure. I.1** . Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement [39].



**Figure I.2.** Compatibilité des mortiers en fonction de leur teneur en fibres d'acier et de leur élongement [39].

La règle suivante est souvent préconisée comme limite pratique de faisabilité pour les CBF [37], [40] :  $V_f/l_f d_f < 3$

$V_f$  : pourcentage volumique des fibres,

$l_f$  et  $d_f$  : sont respectivement la longueur et le diamètre de ces dernières.

### I.3. Les constituants du béton de fibres

Les constituants du CBF sont :

Le gravier, le sable, le ciment, l'eau, des adjuvants, les fibres. Ces derniers se présentent sous différents types. Cette diversité peut se classer selon :

- la nature des fibres : fibres polymériques, métalliques, de verre, de kevlar, de carbone, etc...

- la géométrie des fibres : fibres courtes, longues, droites, ondulées, avec crochets, en faisceau, alignées, d'orientation quelconque, etc...

-La caractérisation mécanique des fibres : fibres flexibles, rigides, ductiles, fragiles, etc...

Certaines fibres subissent une dégradation chimique et même physique dans le milieu cimentaire [41]. Les fibres de verre E , des fibres de polyester présentent un mauvais comportement en milieu alcalin [42]. Diverses études ont été menées pour pallier aux problèmes de dégradation physico-chimique de certaines fibres, notamment par FERA et al [41], [43] et [44]. Par exemple, l'ajout de metakaolin permet d'améliorer la ductilité des composites ciment/verre E [41].

#### **I.4. Types de composites**

En général, le domaine des composites est très vaste et ceux-ci peuvent être divisés en

Quatre types, soit :

- Les composites de fibres
- Les matériaux composites laminés
- Les composites de particules
- Une combinaison des trois premiers

##### **a)- Les composites de fibres**

En général, dans une structure ou un élément, certaines parties sont soumises à des contraintes de compression et d'autres à des contraintes de traction. Le béton, qui est un matériau fragile, résiste très bien à la compression mais mal à la traction. Par contre, l'ajout de fibres permet d'augmenter la résistance à la traction et également la ténacité

En fait, les fibres augmentent l'énergie nécessaire pour propager une fissure et atteindre la rupture telle que décrite par la mécanique de la rupture (Pierre, 1999).

Les composites de fibres sont des matériaux composés d'une matrice dans laquelle divers types de fibres sont ajoutés. Le comportement des composites de fibres est

beaucoup influencé par le type de fibres et leur nature. Il existe deux grands types de fibres, soit les macro fibres et les microfibrilles. Les macro fibres ( $\approx 10$  mm de longueur et plus) qui sont ajoutées au béton afin principalement d'augmenter sa ténacité et les microfibrilles ( $\approx 10$  mm de longueur et moins) qui sont ajoutées à la pâte de ciment afin d'améliorer principalement la résistance à la traction.

La longueur où l'on considère les fibres comme microfibrilles ou macro fibres peut varier en fonction de la composition de la matrice.

### I.5. Rôles des fibres

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers. Parmi les fibres les plus utilisées, citons les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène (tableau I.1).

**Tableau I.1.** Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre en $\mu\text{m}$	Densité	Allongement de rupture en %	Module d'élasticité, en GPa	Résistance en traction, en GPa
Acier	5-500	7,8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2,6	2-3,5	80	2-3
Polypropylène	7,5	0,9	20,0	5	0,5
Particules de mica	0,01-200	2,9	-	170	0,25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	2,3	200	3
Carbone	7,5	1,7-2,0	0,5-1,0	300-400	2-3

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

En règle générale, les fibres sont éparpillées au hasard dans le béton ; toutefois, si on traite le béton pour que les fibres soient alignées dans la direction des contraintes en service, on obtient de meilleures résistances en traction et en flexion. [7]

**Tableau. I.2** Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de Ciment\* [7].

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton, enduit pour blocs de béton.
Acier	Éléments de toiture en béton cellulaire, revêtements de chaussée, tabliers de pont, produits réfractaires, tuyaux en béton, pistes d'atterrissage, réservoirs sous pression, structures résistantes aux explosions, revêtements de tunnel, coques de bateaux.
Polypropylène, nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, éléments flottants de débarcadères et amarres pour les marinas, matériaux de réparation des routes, couches de lest pour les tuyaux sous-marins.
Amiante	Voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toiture plates et ondulées, revêtements de mur.
Carbone	Éléments ondulés pour la construction des planchers, structures de membrane simple ou double courbure, coques de bateaux, planches d'échafaudage.
Particules de mica	Remplacent partiellement l'amiante dans les panneaux à base de ciment, les tuyaux en béton ; matériaux de réparation.
*La combinaison de plusieurs types de fibres peut être utilisée pour des besoins particuliers.	

## I.6. Propriétés du matériau béton composite

Les fibres peuvent améliorer la ténacité, la résistance en flexion ou les deux, et sont choisies en fonction de leur disponibilité, de leur coût et de leurs propriétés.

Par exemple, les fibres de polypropylène augmentent nettement la ténacité du béton mais ont peu d'effet sur sa résistance en traction. Par contre, les mélanges de fibres de polypropylène et de verre donnent un béton de grande résistance en flexion et très tenace (voir les tableaux I. 3 et I.4).

**Tableau.I.3.** Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés [45]

Matériau composite	Volume de fibres (en %)	Résistance en flexion p/r aux produits non renforcés*
BÉTON		
acier	1-2	2,0
verre	1-2	2,5-3,5
MORTIER		
acier	1,3	1,5-1,7
verre	2	1,4-2,3
amiante	3-10	2,0-4,0
PÂTE DE CIMENT		
verre	4,5	1,7-2,0
particules de mica	2-4	2-2,5
polypropylène	1-2	1,0
*Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé et le mélange.		

**Tableau.I.4** Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.[45]

Matériau composite	Volume de fibres en pourcentage (%)	Ténacité p/r aux produits non renforcés*
<b>BÉTON</b>		
acier	0,5	2,5-4,0
acier	1,0	4,0-5,5
acier	1,5	10-25
verre	1,0	1,7-2,0
polypropylène	0,5	1,5-2,0
polypropylène	1,0	2,0-3,5
polypropylène	1,5	3,5-15,0
nylon	1,0	1,5-1,7
<b>MORTIER</b>		
acier	1,3	15,0
amiante	3-10	1,0-1,5
<b>PÂTE DE CIMENT</b>		
verre	4,5	2,0-3,0
particules de mica	2,0-3,0	3,0-3,5
*Ces valeurs sont des valeurs types seulement et peuvent varier selon la méthode d'essai, le procédé et le mélange.		

En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 p. 100 de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20 p. 100.

Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres. Le retrait du béton peut être diminué de 35 p. 100 ou moins si l'on ajoute 1,5 p. 100 de fibres par volume.

D'autres propriétés du béton comme la résistance en compression et le module d'élasticité ne figurent pas dans les tableaux car elles sont nettement moins touchées par la présence des fibres.[7]

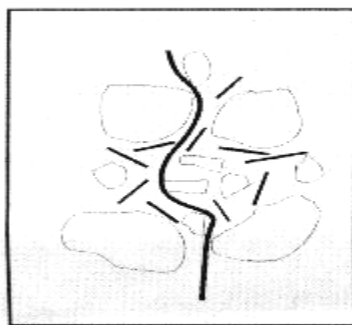
## I.7. Notion d'ouvrabilité d'un béton de fibres

Les propos qui suivent ne concernent que les fibres rigides quels que soient leurs modes d'élaboration, les fibres souples, ayant des propriétés différentes, doivent être étudiées séparément. La plupart d'entre elles sont en acier, leurs caractéristiques mécaniques dépendent essentiellement de leur mode d'élaboration et de leurs dimensions.

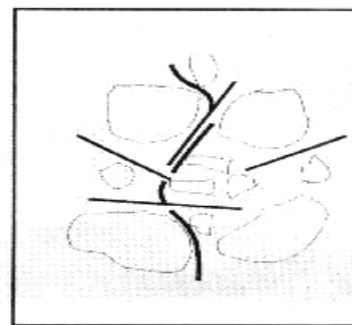
### I.7.1. Longueur des fibres

Pour que celles-ci puissent être considérées comme armatures de renfort homogène, il faut qu'au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, elles bloquent le développement prématuré des fissures inter granulaires.

Ainsi, il faut donc que la longueur de la fibre représente environ trois fois la dimension du plus gros granulat. Les fibres courtes seraient contournées, voire elles-mêmes source de trop nombreuses amorces de rupture si la liaison fibre matrice était de mauvaise qualité. [12]



Fibres courtes contournées  
par la fissure



Verrouillage de la fissure par  
les fibres longues

Figure I.3. Verrouillage de la fissure

### I.7.2. Dimensions des plus gros granulats et pourcentage maximum en fibres

Pour renforcer une matrice suivant les trois directions de l'espace Romuladi[13] a montré que l'espacement  $E$  des fibres, pour un pourcentage volumique  $V_f$  de fibres de diamètre  $d$ , dans le cas d'une distribution aléatoire pouvait s'écrire.

$$E = \frac{13,8}{\sqrt{V_f}} \cdot d$$

Cet espacement  $E$  moyen ne pouvant être inférieur à la dimension du plus gros granulat. Il s'agit ici de fibres rigides qui imposent, par leur faible mobilité au sein du béton frais, une organisation du squelette granulaire.

### I.7.3. Facteurs influençant la rhéologie du béton frais

Les paramètres agissants sur l'ouvrabilité sont nombreux, parmi les principaux on peut noter :

- La longueur des fibres
- Le pourcentage volumique des fibres
- La granularité du squelette et son étendue
- La présence d'adjuvant.

#### a) Influence de la géométrie des fibres et du dosage sur l'ouvrabilité:

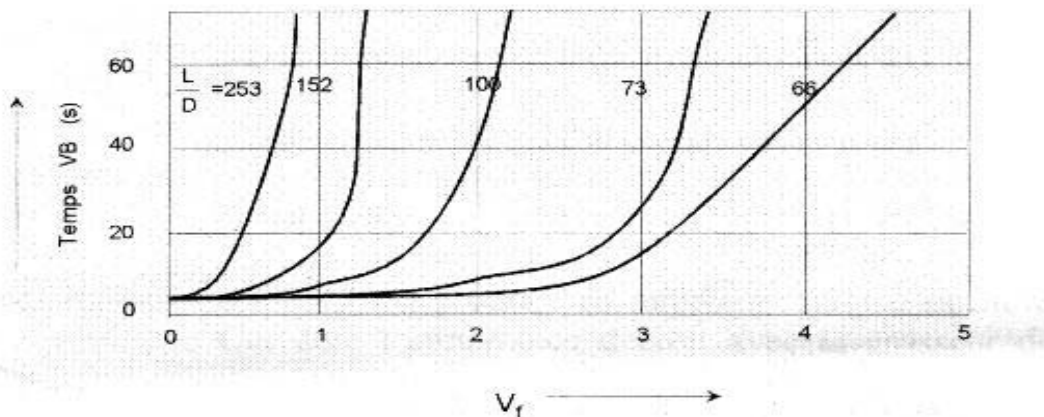


Figure I. 4 . Ouvrabilité en fonction de  $V_f$  et du rapport  $l/d$

Les travaux de Swamy[14] et d'EDING TON[13] précisent bien ce point. La figure I.4 montre la diminution de la maniabilité en fonction de l'élanement des fibres  $l/d$  et du pourcentage volumique.

Bien qu'analysé en terme d'élanement, ce qui peut-être discuté, on observe que pour des valeurs supérieures à 100 (soit une fibre de  $0,5 \times 50$  mm) on perd rapidement en maniabilité. On observe par ailleurs que pour une fibre donnée, il existe un pourcentage maximum pour lequel il est quasiment impossible d'effectuer la mise en œuvre.

### b) Influence de la granularité du squelette et de son étendue

Comme pour un béton ordinaire c'est la fraction fine du squelette granulaire (ciment, sable) en présence d'eau qui apporte l'ouvrabilité.

La figure I.5 visualise pour une fibre donnée ( $l/d = 100$ ), l'incidence de la dimension du plus gros granulats sur le temps d'écoulement.

Pour un béton de 20mm, il est quasiment impossible d'obtenir une ouvrabilité acceptable pour un dosage en fibres dépassant 0,5%, alors que pour un béton de 10mm cela est encore concevable.

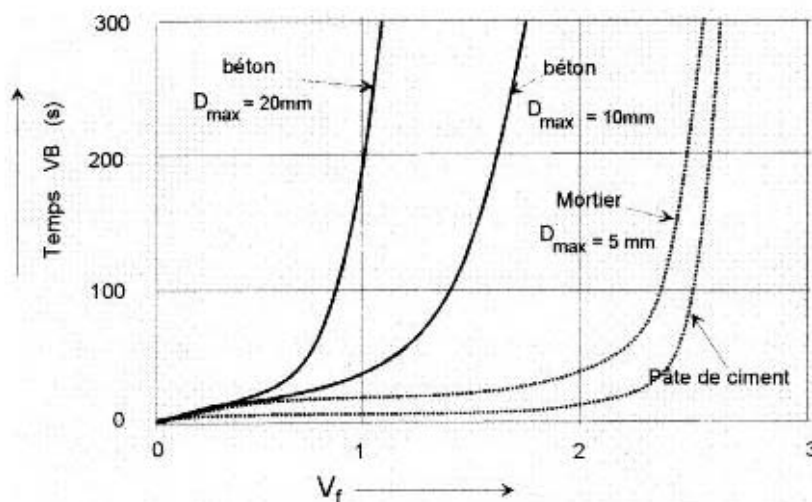


Figure I. 5. Ouvrabilité en fonction de  $V_f$  et  $D_{max}$  ( $l/d = 100$ )

On peut donc en conclure qu'il existe, pour les pourcentages élevés, une sorte de verrouillage 'graviers- fibres' qui empêche toute mobilité, le mortier seul pouvant s'écouler au travers de la structure rigide et permettre un certain remplissage.

### c) Influence des adjuvants

L'utilisation d'adjuvants, plastifiants ou fluidifiants est indispensable pour obtenir une maniabilité suffisante des bétons armés de fibres, dès que celles-ci ont des élancements élevés. Sans eux, il serait totalement impossible de réaliser des gâchées homogènes, car le malaxage serait quasiment impossible, quant au "coulage" il devient illusoire pour des pourcentages de l'ordre de 1%, le terme même est utopique.

Néanmoins, l'étude de convenance est absolument nécessaire, surtout pour les fluidifiants qui ont une action limitée dans le temps et qui de plus peuvent provoquer en conjonction avec la nature du liant (notamment la teneur en ions  $SO_4$ ) des prises précoces [15]).

C'est pourquoi, il convient de faire des essais préliminaires avec le ciment et l'adjuvant choisis, de préférence en sur dosant l'adjuvant afin de s'assurer de l'absence d'une modification excessive des caractéristiques de prise [16].

## I.8. Mise en œuvre des bétons de fibres

Les méthodes actuelles de formulation, permettent d'obtenir des bétons de fibres à la maniabilité souhaitée, même lorsque le pourcentage de fibres incorporé est important.

Lorsqu'on met en œuvre un BF dont la formulation a été préalablement optimisée, il est important de connaître et de tenir compte de certaines spécificités de ce **BF**, liées à la technologie de mise en œuvre adoptée et du type de structure. Ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante : [17]

- L'orientation préférentielle des fibres ;
- Les effets de « voûte » ou d'écran ;
- Les effets de « cheminée » ;
- La ségrégation des fibres ;

-La relation entre le rapport longueur /diamètre de la fibre et la maniabilité du BF .

- **L'orientation préférentielle des fibres :**

Cette orientation a plusieurs origines qui sont principalement :

- \* La technique de mise en œuvre adoptée ;
- \* Les effets liés à l'écoulement du BF

- **Les effets de « voûte » ou d'écran**

Ces effets de voûte apparaissent lorsqu'un obstacle s'oppose au déplacement des fibres. Dans ce cas-là, des fibres peuvent s'accumuler et former un paquet qui, en empêchant le déplacement des autres fibres, mais également des gros granulats du BF, induit de la ségrégation.

- **Les effets de « cheminée »**

Ce phénomène apparaît lorsqu'un **BF** assez visqueux et contenant un pourcentage de fibres important (supérieur à  $50\text{kg}/\text{m}^3$ ) est vibré à l'aide d'une aiguille vibrante .

- **Relation entre le rapport longueur /diamètre de la fibre et la maniabilité du BF :**

- Des études expérimentales antérieures, réalisées par Snyder et Lancard [18], Swamy et Mangat[19]I-ou,encore,HughesetFattuhi[20], ont montré que le rapport longueur /diamètre des fibres cylindriques joue un rôle central dans la maniabilité d'un BF .

Ainsi, pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand plus la maniabilité du BF est mauvaise, et plus la formation de pelotes de fibres au sein de la matrice est grande.

## **I.9. Formulation des bétons de fibres**

L'optimisation de la composition des BF est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibre . En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice et d'altérer sa

compacité. Il est évident que cette perturbation est d'autant plus importante que le pourcentage de fibre est élevé, et que pour des dosages

« homéopathiques », c'est-à-dire allant de 15 à 30 kg /m<sup>3</sup>, la formulation de la matrice peut rester inchangée. Au contraire, pour des BF que l'on peut réellement considérer comme des composites fibrés en terme de fonctionnement mécanique, c'est-à-dire comportant au moins 50 kg /m<sup>3</sup> de fibres, il est impératif de reformuler la matrice [17].

### I.9.1. Description de la méthode

Il s'agit de la méthode de Barron –Lesage qui a été développée au laboratoire central des ponts et de chaussées, il y a une quinzaine d'année, pour optimiser le squelette granulaire des bétons non fibrés. Cette méthode est fondée sur trois hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience :

- Pour un rapport eau / liant fixé au départ ; le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus compact,
- 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.

On fait varier le rapport massique S /S +G (S : sable, G : granulats) et on détermine pour chaque valeur de ce rapport la maniabilité correspondante. On trace alors la courbe maniabilité fonction du rapport S /S +G, et on détermine le rapport optimal qui correspond à la meilleure maniabilité [17]. ( figure I.6)

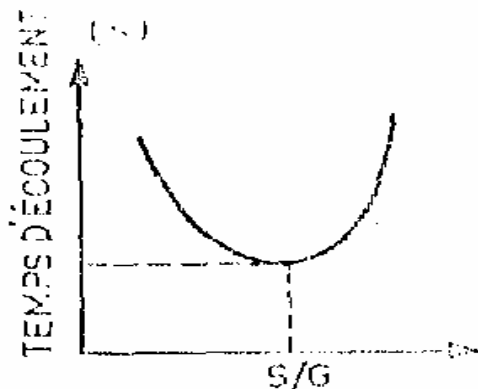


Figure I. 6 . Détermination du rapport S/G optimal [21]

### **Remarque**

La maniabilité peut se déterminer suivant différentes méthodes expérimentales. Parmi les plus utilisés le cône d'Abrams et le maniabilimètre LCL.

- Le cône d'Abrams. Il peut être qualifié d'essai « statique », puisqu'il met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous l'effet de la pesanteur. la maniabilité y est caractérisée par une hauteur d'affaissement ;
- Le maniabilimètre LCL .Il est, quant à lui, un essai « dynamique » qui met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous vibration. la maniabilité est alors caractérisée par un temps d'écoulement ;

### **I.9.2. Méthode de composition des bétons de fibres**

Il n'existe pas encore de méthodes de composition spécifique aux bétons de fibres. Les méthodes de composition traditionnelles (Bolomey, Dreux, Baron –Lesage, .. .) conçues principalement pour les bétons ordinaires, restent valable pour les bétons de fibres [22].

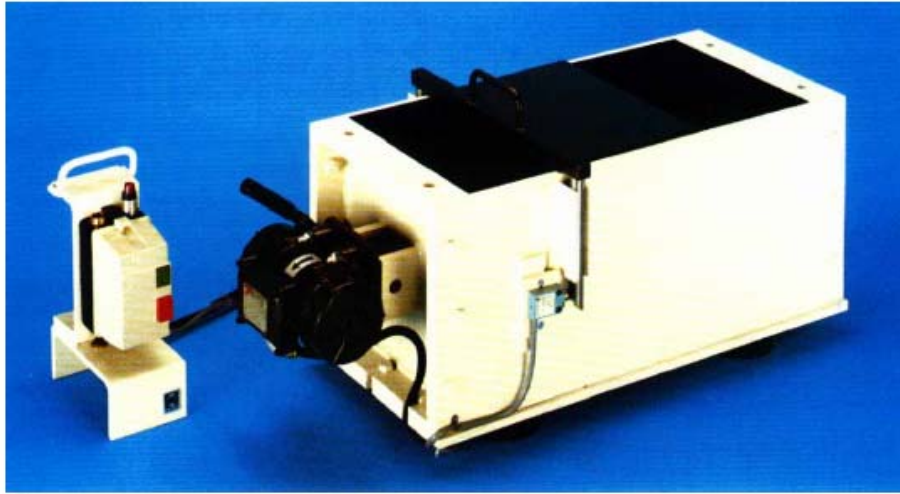
Une première tentative a été présentée par p. SERNA – ROS [23] pour l'élaboration d'une méthode de formulation optimale du béton de fibres basée sur la méthode de composition baron – Lesage [24].

Dans cette étude P. SERMA-ROS propose un abaque permettant d'établir une formulation de béton renforcé de fibres métalliques, mais il reste évident que d'autres études sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

Il est à noter que l'ajout de fibres diminue considérablement la maniabilité des bétons, propriété essentielle sur laquelle est fondée la méthode de Baron Lesage. Cependant cette dernière semble encore la mieux adaptée pour la composition d'un béton de fibres.

La maniabilité peut être mesurée à partir d'essais d'écoulement statique du béton frais au cône d'Abrams qui tout en étant facile à réaliser n'est pas un bon indicateur de l'ouvrabilité des B.F.M [26 -27] ou par des essais d'écoulement dynamique permettant la mesure d'un temps d'écoulement d'un béton soumis à une vibration donnée. cet essai est réalisé sur le maniabilimètre Lesage du L.C.P.C .

L'essai de maniabilimètre Proposée en 1969 par J. Baron et R. Lesage au laboratoire Central des ponts et des chaussées (L. C.P.C) de Paris. (Figure I. 7)



**Figure I.7.** Maniabilimètre à béton lcl [25 ]

Le « MANIABILIMETRE LCL » appelé aussi « PLASTICIMETRE LCL » permet de tester le BETON du point de vue de sa maniabilité dynamique.

#### **a)- Principe de l'essai**

L'appareil est constitué de deux volumes séparés par une paroi amovible. Le plus grand des deux volumes étant rempli du béton à essayer. L'extraction de la paroi met en marche un vibreur.

L'essai consiste à mesurer, après enlèvement de la paroi amovible, le temps que met le béton, sous l'action d'une vibration pour atteindre un repère de mesure gravé sur une paroi du volume vide. Ce temps peut varier de quelques secondes à quelques minutes suivant les dosages.

#### **b)- Caractéristiques**

- Volume maximal du béton testé ..... 40 litres
- Vibreur PTC à amplitude réglable :
- Puissance .....300 W

- Force centrifuge réglable ..... 1, 2, 3 ou 4 Kn
- Fréquence de vibration ..... 2950 à 2980 cycles/minutes
- Sensibilité dans la discrimination des teneurs en eau .....  $\pm 0.2\%$  à  $0.5\%$
- Alimentation électrique..... 50 Hz triphasé 380 V
- Dimensions intérieures ..... 300 x 600 mm

## I.10. Comportement mécanique de béton de fibres

La sollicitation du béton de fibres illustre de façon claire le rôle joué par les fibres sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Dans le cas du béton sans fibres, le diagramme efforts –déformation est caractérisé par une phase fragile du matériau. La présence des fibres sur le plan de la fissure, permet d’atténuer cette fragilité du béton en retenant les deux blocs de béton fissuré offrant ainsi une certaine ductilité [8].

D’après P Rossi, la présence des fibres dans la matrice béton joue deux rôles en sens opposées coté positif et coté négatif [8].

### a)- Côte positif

P Rossi (1991) distingue les actions des fibres suivant deux échelles.

A l’échelle de matériau en « cousant » les microfissures. Cette action peut provoquer une augmentation de résistance à la traction du matériau .cette augmentation dépendait du pourcentage de fibres.

A l’échelle de la structure en « reprenant » les efforts à travers les microfissures on aura donc une bonne stabilité de la structure ce qui aboutit à la croissance de la ductilité de la structure.

### b)- Côte négatif

Les fibres réduisent la compacité du matériau et cause une diminution à la résistance de traction.

#### I.10.1. Résistance à la traction par flexion

D’après Wolfgang.J, la résistance du béton renforcé de fibres d’acier à la traction par

flexion reste inchangée avec les dosages courants de fibres et la matrice du béton est identique (avec les mêmes adjuvants) .par contre il affirme que le rôle des fibres est plutôt dans la phase post fissuration, en effet il observe une certaine ductilité, et cette ductilité augmente avec la forme de la fibre.

### **I.10.2. Résistance à la compression**

Les essais réalisés au LCPC, montrent que tous les bétons de fibres métalliques présentent une résistance à la compression inférieure à celle du béton sans fibres, et on observe une légère diminution du module d'Young et de la contrainte au pic, mais une augmentation plus ou moins importante de la ductilité (suivant le type, la géométrie et le pourcentage de fibres) [9 ]

P Rossi explique la diminution de la résistance à partir des formules de Feret comme suit : Lorsqu'il faut conserver au BFM une bonne maniabilité, l'introduction de fibres conduit nécessairement à augmenter la quantité de ciment et (ou) de sable. Or , ce faisant , on augmente la porosité de la matrice .sachant que, pour des granulats donnés, les résistances en compression et en traction de la matrice diminuent avec l'augmentation de sa porosité [17]. La diminution du module de Young est expliquée par le fait que les béton de fibres métalliques contiennent plus de vides que le béton ordinaire [9] .

### **I.10.3. Influence du pourcentage de fibres, type de fibres sur le comportement mécanique de BAF**

On pourrait naïvement, penser que plus on augmente le pourcentage de fibres dans un BAF, plus on augmente leur efficacité vis-à-vis du comportement à l'échelle du matériau ou à celle de la structure, que ce soit des fibres courtes ou des fibres longues.

Le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer, par exemple une fibre courte pour augmenter les résistances (traction, compression..), une fibre longue pour améliorer le comportement post fissuration du BAF.

Il est indiqué, précédemment, que les fibres longues en faible pourcentage (pour des raisons de maniabilité) n'interviennent pas sur les résistances. En conséquence, l'introduction de fibres longues conduit à une matrice moins résistance, qu'elles ne renforcent pas. La conclusion est donc que les BFM constitués de fibres longues ont toujours des résistance en compression et on traction inférieures à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente [7].

## **I.11. Les applications pratiques des bétons de fibres**

Il ne faut pas considérer les bétons renforcés de fibres comme un substitut au béton ordinaire, mais comme un matériau d'un nouveau type, qui devient intéressant dans l'optique de la conception d'une structure performante.

Aujourd'hui, avec des dosages en fibres d'acier limité à 1% volumique (soit 80kg /m<sup>3</sup>) l'industrie de la construction dispose d'un matériau performant (bonne maniabilité, bonne performances mécaniques) et surtout économique au regard de certaines application spécifiques [ 10].

L'utilisation des bétons de fibres métalliques s'est tout naturellement orientée vers les structures présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons conventionnels.

### **I.11.1. Les dalles**

Les dalles d'aéroport ou les dallages industriels sont soumis à des sollicitations complexes (charges importantes, poinçonnement, rotation ponctuelles).avec des fibres dans tous le volume de béton, le renforcement est quasi isotrope, ce qui évite des dégradations locales de ces structures [10] .

Dans le cas des dallages l'expérience a montré qu'un dosage adéquat de fibres (de l'ordre de  $20\text{kg}/\text{m}^3$ ) peut avantageusement remplacer les treillis traditionnels, réduisant ainsi les coût de construction [11].

### **I.11.2. Les resurfacages**

Les resurfacages minces constituent une technique intéressante pour restaurer les dégradations de surface des chaussées ou des infrastructures routières. La présence des fibres dans des chopes d'épaisseur réduite permet de stabiliser les éventuelles fissures qu'elles soient d'origine physique (retrait, dilatation) ou mécanique (réflexion de la sous structure) [ 10].

### **I.11.3. Fondation de machines**

Ces fondations demandent un matériau qui possède de bonnes propriétés concernant la résistance au choc, résistance au feu, l'amortissement de vibrations, l'adhérence des boulons de fondations, l'isotropie de caractéristiques mécaniques.

Les bétons de fibres permettent de mieux répondre à ces exigences. [46 ]

### **I.11.4. Fondations profondes**

Le béton de fibres est employé pour les pieux préfabriqués mis en place par battage et pour les pieux forés.

Pour les pieux préfabriqués, l'emploi des fibres permet d'améliorer le comportement en sollicitation dynamique.

Pour les pieux forés, le béton de fibres est employé à fin de remédier à des difficultés liées à la mise en place des cages d'armatures, ainsi il est employé en vue de remplacer totalement ou partiellement les armatures traditionnelles [ 47 ].

### **I.11.5. Construction hydraulique**

Béton mis en œuvre sous l'eau, la meilleure cohésion du béton apportée par les fibres permet la facilité de mise en œuvre.

Revêtement de rives, les fibres augmentent la cohésion du béton non durci et suppriment les contres coffrages.

### **I.11.6. Remplacement ou addition des fibres aux armatures transversales**

Dans ce but, un programme de recherche a été lancé afin d'examiner, au CSTC, la possibilité de remplacement ou de renforcement de l'armature transversale, les résultats étaient les suivants [ 48 ].

- L'utilisation de fibres d'acier peut être favorable si les tensions sont distribuées sur la section entière de béton, comme le cas des efforts tranchants.

- Le dosage en fibres de  $30\text{kg}/\text{m}^3$  est insuffisant pour redistribuer les efforts tranchants.

- Le renforcement seulement par fibres dans l'âme de la poutre ne suffit pas étant donné l'importance du lien entre l'âme et la table de la poutre.

- On obtient de bons résultats avec un renforcement d'au moins  $40\text{kg}/\text{m}^3$  dans la section entière.

## I.12. Conclusion du chapitre

Le béton est un matériau fissurable de nature et résiste mal à la traction. L'ajout de fibres au béton est une des solutions traitant la fissuration de ce matériau. Dans ce contexte, il ne suffit pas d'introduire de fibres dans un béton pour avoir un excellent matériau fibré. Pour être efficaces il faut souligner sur les points suivants :

- les fibres doivent être bien ancrées, elles posséderont alors des longueurs suffisantes ou bien des formes adaptées, donc il est important d'optimiser le choix de la fibre (type de fibre, dimensions, caractéristique mécanique ) en fonction du comportement mécanique que l'on désire améliorer.

- l'ajout de fibres diminue considérablement la maniabilité des bétons, pour cela l'optimisation de la composition des BAF est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau.

- La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice et altère sa compacité, il est impératif donc de reformuler la matrice.

- la méthode de Baron Lesage est la mieux adaptée pour la composition d'un béton de fibres.

- Les méthodes actuelles de formulation, permettent d'obtenir des bétons de fibres à maniabilité souhaitée, même lorsque le pourcentage de fibres incorporé est important.

- Il est important de connaître et de tenir compte de certaines spécificités de ce **BAF** , en particulier la technologie de mise en œuvre adoptée pour conserver une certaine homogénéité.

Dans ce chapitre on a présenté de façon générale la technologie du béton renforcé de fibres, les différentes fibres utilisées dans le renforcement de béton, les méthodes de formulation, le comportement mécanique des bétons de fibres vis-à-vis des sollicitations .et en fin les applications potentielles de ces bétons.

La synthèse de cette recherche bibliographique, nous a permis de s'intéresser au mode de comportement des bétons composites à base d'ajout hybride de fibres, dans le but d'améliorer son comportement jusqu'à rupture.

Nous considérons que l'ajout de fibres de nature différentes mais présentant une certaine compatibilité du travail mécanique en quantités minimales, et présentant une faible résistance permettra sans aucun doute d'assurer un certain retour de rigidité ; ce qui évitera la rupture fragile des éléments de structure.

## **Chapitre II. Formulation et Elaboration d'éprouvettes d'essais**

### **PARTIE I : DIFFERENTS ESSAIS SUR LES CONSTITUANTS DE BETON COMPOSITE**

#### **II .1.1. Généralités**

Les Bétons de Fibres (BF) ont fait l'objet depuis maintenant une quarantaine d'années d'efforts de recherche importants : compréhension de l'interaction fibre matrice, énoncés de principes de formulation, règles de calculs - basées notamment sur les lois contrainte ouverture de fissure, et finalement un panel d'applications industrielles ciblées. Parmi celles-ci on peut citer les dallages industriels, les réparations par béton projeté fibré, la réalisation de pieux forés en zone sismiques, et le remplacement des armatures passives d'effort tranchant dans certains éléments structuraux.

#### **II.1.2. Matériaux utilisés**

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes limités à une seule composition en granulats. Le sable roulé (0/5) de la sablière Baghlia, le gravier (8/15) de la carrière Boussaâda . L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée suivant la norme NF P18-560, avec une tamiseuse à fréquence réglable, de 50 Hz. la durée de vibration est de 15 mn, les quantités des granulats testés sont ;1500 g pour le sable 0/5 ,3000g pour le gravier 8/15 et Ils ont été, au préalable, lavés et séchés. Les résultats sont résumés dans les tableaux .les modules des tamis ( $m_{tam}$ ) sont calculés à partir de la formule suivante ou , D représente le diamètre des mailles des tamis .

$$m_{tam}=10.\text{Log}_{10}(D.10^3)+1$$

Les propriétés des matériaux composites sont fonction des propriétés élémentaires de chaque constituant .C'est pour cela, on a effectué plusieurs essais et analyses pour chaque un des constituants .

### II.1.2.1. Analyse granulométrique du sable

**Tableau II.1.** Analyse granulométrique du sable : NF P18.560

échantillon : <b>SABLE.</b>			
Premier échantillon pour établissement du rapport $M_{1S}/M_{1h}$ $M_{1S}= 589.0 \text{ g}$ $M_{1h}=600.0\text{g}$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1500.0\text{g}$ Masse totale sèche : $M_s=( M_{1S}/M_{1h}) M_h=1472.5\text{g}$ Masse sèche après lavage : $M_{S1}=1446.0\text{g}$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	113.9	7.74	92.26
4	169.0	11.48	88.52
3.15	266.2	18.08	81.92
2.5	321.9	21.86	78.14
1.25	583.2	39.61	60.39
0.63	958.4	65.09	34.91
0.315	1266.2	85.99	14.01
0.16	1407.8	95.61	4.39
0.125	1427.3	96.93	3.07
0.08	1439.7	97.77	2.23
Fond de tamis :	1446.0	98.20	1.80
	$R_n=1439.7$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=6.3\text{g}$	<b>Observation</b> :- sable analysé et caractérisé par un <b>module de finesse <math>M_f=3.45</math></b> <b>- pourcentage en particules fines : <math>\zeta=1.8\%</math>.</b> <b>-taux d'humidité : <math>w=1.87\%</math></b>		
$R_n + T_n=1446.0\text{g}$			
$100(M_{S1}- (R_n + T_n))/ M_{S1}=0.0$			

### II.1.2.2. Essai : Equivalent de sable

**Tableau II.2.** Équivalent de sable

Nature	Es	
	A vue	Au piston
<b>Sable</b>	<b>90.94</b>	<b>88.36</b>

### II.1.2.3. Résultats des essais physiques sur le sable

Consistent à mesurer les masses volumiques, la porosité, le coefficient d'absorption et la teneur en eau :

Des essais physiques ont été réalisés sur granulats (sable, gravier) afin de déterminer les masses volumiques, porosité, taux d'absorption selon les normes NF P18.554 ,555 et la propreté de sable selon la norme NF P18.598. Les résultats sont résumés dans les tableaux Suivantes.

**Tableau II.3.** Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau .

<b>Echantillon</b>	<i>Masse volumique réelle (<math>t/m^3</math>)</i>	<i>Masse volumique imbibée (<math>t/m^3</math>)</i>	<i>Taux d'absorption (%)</i>	<i>Porosité (%)</i>
<b>Sable</b>	2.64	2.71	2.55	-

### II.1.2.4. Analyse chimique du sable

**Tableau II.4.** Composition chimique du sable utilisé

<b>Echantillon</b>		<b>Sable</b>
Perte au feu	%	<b>3.29</b>
Somme des conc.	%	<b>100</b>
SiO <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> %	<b>71.52</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> %	<b>12.66</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> %	<b>3.45</b>
CaO	Ca <sub>2</sub> %	<b>2.58</b>
MgO	Mg <sub>2</sub> %	<b>0.95</b>
SO <sub>3</sub>	S <sub>2</sub> %	<b>0.05</b>
K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> %	<b>2.81</b>
Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> %	<b>2.19</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> %	<b>0.09</b>
TiO <sub>2</sub>	Ti <sub>2</sub> %	<b>0.04</b>

### II.1.2.5. Analyse granulométrique du gravier

**Tableau II.5.** Analyse granulométrique du gravier 8/15: NF P18.56

échantillon : <b>GRAVIER 8/15</b>			
Premier échantillon pour établissement du rapport $M_{1s}/M_{1h}$ <b><math>M_{1s}=599.5g</math>                      <math>M_{1h}=600.0g</math></b>			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : <b><math>M_h=3000.0g</math></b> Masse totale sèche : $M_s=(M_{1s}/M_{1h}) M_h=2997.5g$ Masse sèche après lavage : $M_{S1}=2991.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
16	0.00	0.00	100.0
12.5	594	19.82	80.18
10	2014	67.19	32.81
8	2742	91.48	08.52
6.3	2960	98.75	01.25
5			
Fond de tamis :	2991.0	99.78	00.22
	$R_n=2960$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=3.1g$	<b>Observation : propreté superficielle : <math>\xi=0.08\%</math></b> <b>Taux d'humidité : <math>w=0.22\%</math></b>		
$R_n + T_n=2991.0g$			
$100(M_{S1} - (R_n + T_n)) / M_{S1}=0.0$			

### II.1.2.6. Résultats des essais physiques sur le gravier

**Tableau II.6.** Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau

Echantillon	Masse volumique réelle ( $t/m^3$ )	Masse volumique imbibée ( $t/m^3$ )	Taux d'absorption (%)	Porosité (%)
<b>Gravier 8/15</b>	2.66	2.67	0.48	1.29

### II.1.2.6. 1. Analyse chimique de gravier

**Tableau II.7.** Composition chimique du gravier utilisé

<b>Echantillon</b>		<b>Sable</b>
Perte au feu	%	<b>41.85</b>
Somme des conc.	%	<b>100</b>
SiO <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> %	<b>3.89</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> %	<b>0.44</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> %	<b>0.54</b>
CaO	Ca <sub>2</sub> %	<b>52.06</b>
MgO	Mg <sub>2</sub> %	<b>0.85</b>
SO <sub>3</sub>	S <sub>2</sub> %	<b>0.13</b>
K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> %	<b>0.14</b>
Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> %	<b>0.04</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> %	<b>0.05</b>
TiO <sub>2</sub>	Ti <sub>2</sub> %	<b>0.03</b>

### II.1.2.7. Ciment

#### II.1.2.7.1 Résultats des essais physiques sur le ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment, issu de la cimenterie de MEFTAH. Des essais physico- mécaniques, chimiques et minéralogiques sur ciment sont réalisés selon les normes EN 196-2, EN 196-3 et selon la méthode microscopique (ONO). Les résultats des essais sur ciment sont résumés dans les tableaux .

**Tableau II.8.** Résultats des essais physiques sur ciment.

		<b>Résultats</b>
<b>Consistance normalisée</b>	H <sub>2</sub> O	25.51 %
<b>Temps de prise</b>	Début	170 mn
	Fin	240 mn
<b>Stabilité</b>	Froid	-
	Chaud	1.05 mm
<b>Essai de retrait</b>	03 jours	170.98 µm/m
	07 jours	345.85 µm/m
	28 jours	555.93 µm/m
<b>Essai de gonflement</b>	03 jours	2.78 µm/m
	07 jours	11.17 µm/m
	28 jours	15.28 µm/m
<b>Masse volumique absolue du ciment</b>		3.12g/cm <sup>3</sup>
<b>Finesse suivant la méthode Blaine</b>		3382 cm <sup>2</sup> /g

### II.1.2.7.2. Résultats des essais mécaniques sur ciment

Les différents résultats des essais sont présentés dans le tableau II.9.

**Tableau II.9.** Résultats des essais mécaniques sur ciment.

<b>Echéances en jours</b>	<b>Flexion</b>	<b>Compression</b>
<b>02 jours</b>	4.70 MPa	20.20 MPa
<b>07 Jours</b>	6.58 MPa	32.91 MPa
<b>28 Jours</b>	7.71 MPa	41.68 MPa

### II.1.2.7.3. Résultats d'analyses chimiques sur ciment

Les différents résultats des essais sont présentés dans le tableau II.10.

**Tableau II.10.** Résultats de l'analyse chimique de ciment.

<i>Composition Chimique</i>	<i>Teneur %</i>
SiO <sub>2</sub>	22.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.85
CaO	60.18
MgO	1.28
K <sub>2</sub> O	0.86
Na <sub>2</sub> O	0.29
SO <sub>3</sub>	2.95
CaO libre	1.05
Cl <sup>-</sup>	0.008
Ins.	4.49
P.F	2.86

### II.1.2.8. FIBRE DE VERRE

#### II.1.2.8.1. Historique

Brevetée par la société américaine Owens Illinois au cours des années 1930, la fibre de verre constitue une avancée technologique récente de l'industrie verrière.

Historiquement, elle a néanmoins précédé les développements du flottage du verre plat sur bain d'étain (1952) et de la fibre optique, suite à la mise au point du laser (années 1960).

Aussi mince qu'un cheveu, aussi résistante que l'acier, elle trouve des applications dans deux domaines distincts, l'**isolation** et le **renforcement**.. [30]



**Figure II.1.** Type de fibres de verre utilisées

### II.1.2.8.2. Propriétés de fibre de verre

#### II.1.2.8.2. 1. Composition chimique

La composition chimique des fibres de verres utilisés dans notre béton composite est donnée dans le tableau II.11.

**Tableau II.11.** Compositions chimiques de fibres de verre [31]

Principaux constituants	Composition
SiO <sub>2</sub>	55-75%
Zr O <sub>2</sub>	15-20%
Oxydes alcalins (Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O)	11-21%
Oxydes alcalino terreux (CaO, MgO....)	0-6%
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-2%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-5%
TiO <sub>2</sub>	0-3%
F <sub>2</sub>	0-2%

### II.1.2.8.2. 2. Propriétés physiques et chimiques [31]

- ETAT PHYSIQUE : solide
- FORME : fibres coupées de 2.5cm de longueur.
- COULEUR : colorée en rose
- TEMPERATURE DE CHANGEMENT D'ETAT : Ramollissement (point de Littleton)  
: Environ 850°C - point de fusion : environ 1200°C
- TEMPERATURE DE DECOMPOSITION : Seuls les produits d'ensimage et les  
Éventuels liants pour mat sont décomposés à partir de température de 200°C
- MASSE VOLUMIQUE (du verre en masse) : 2,7 g/c

### II.1.2.8.2. 3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont présentées dans le tableau II.12.

**Tableau II.12.** Caractéristique mécanique de fibre de verre (AR) [32]

Contrainte à la rupture en traction .....(MPa)	3700
Module d'élasticité en traction ..... (GPa)	76
Taux d'allongement à la rupture en traction ..... %	4,9

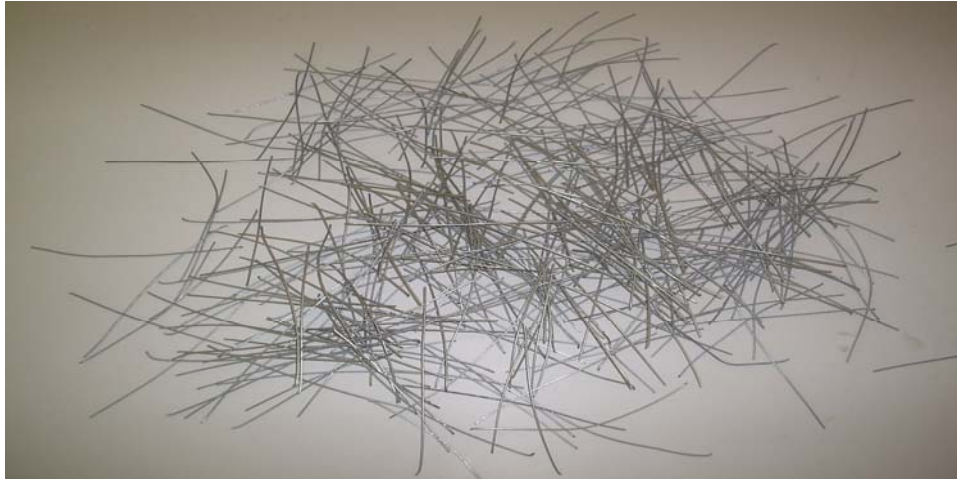
### II.1.2.9. Fibres d'acier

#### II.1.2.9.1. Nature des fibres d'aciers utilisés

Les fibres d'acier sont sans doute les fibres les plus utilisées dans la fabrication des matériaux composites à matrice cimentaire et c'est avec ce type de fibres que les recherches les plus importantes ont été entreprises jusqu'à présent.

La plupart des fibres métalliques sont en acier ordinaire et présentent une forte résistance en traction comprise entre 1 GPa et 2 GPa, une masse volumique de 7.85 T/m<sup>3</sup> et un coefficient de dilatation thermique du même ordre de grandeur que celui de la pâte de ciment. Elles possèdent une excellente tenue au feu.

Plusieurs types de fibres d'acier proposées de géométries différentes sont proposés par les fabricants (fibre à crochets, fibre ondulée, fibre droite, fibres accolées, .....).



**Figure II.2.** Fibres d'aciers utilisés

La géométrie des fibres est définie par leur longueur et leur diamètre, dont le rapport appelé longueur relative ou élancement a une grande influence sur la maniabilité du béton composite. SWAMY et MANGAT [33] ainsi que EDGINGTON [34] ont constaté que la diminution de la maniabilité dépend de l'élancement des fibres  $l_f / d_f$  et du pourcentage volumique  $v_f$ .

Par ailleurs et pour que les fibres jouent leur rôle d'arrêt des microfissures, il est nécessaire qu'elles adhèrent bien à la matrice ce qui signifie une augmentation de leur longueur pour assurer un ancrage suffisant.

Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre l'élancement des fibres et la maniabilité des bétons.

### II.1.2.9.2. Les caractéristiques de fibres d'aciers utilisées

Les fibres utilisées sont les fils d'attache de plâtre qu'on a découpé à l'aide d'un sisail pour préparer des fibres droite.

Leurs caractéristiques géométriques, physiques et mécaniques sont déterminées au niveau du laboratoire.

**Tableau II.13.** Caractéristique géométrique – physique et mécanique de la fibre d'acier

Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse volumique ( $t/m^3$ )	F rupt (N)	$\zeta$ –Rupt (mm)
80-100	0,8	6,8	148.97	1.66

## **PARTIE II : PREPARATION DES EPROUVETTES**

### **II.2.1. INTRODUCTION**

Par ses nombreuses qualités, le béton se prête à de multiples conceptions nouvelles. Non seulement il peut être moulé dans les formes les plus diverses, mais il a une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est peu combustible et peu toxique.

Deux caractéristiques ont néanmoins limité son utilisation : il est fragile et résiste mal à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites renforcés de fibres dans les secteurs de la construction a offert la possibilité de pallier ces lacunes. Ce travail décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres de verre et fibre d'acier. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration par la simple addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation très intéressante.

Les matériaux composites sont des matériaux solides, hétérogènes et anisotropes, constitués par l'association à l'échelle microscopique de deux (ou de plusieurs) autres matériaux aux caractéristiques complémentaires; cette association leur confère à l'échelle macroscopique un ensemble de propriétés notamment mécaniques, que chacun des constituantes pris isolément ne possède pas.

Les premiers développements des composites ont été liés aux besoins des industries aérospatiales en matériaux à caractéristiques mécaniques élevées associés à un faible poids.

Actuellement, ils sont présents dans tous les secteurs industriels. le béton seul résiste très bien aux sollicitations mécaniques par compression mais mal aux efforts de traction; le béton armé, dans lequel est incorporée une armature métallique, présente la bonne résistance en compression du béton et l'excellente résistance en traction de l'acier (son inconvénient est sa masse volumique relativement élevée).

## **II.2.2. Méthode de composition adoptée**

### **II.2.2.1. Formulation du béton selon BARON-LESAGE**

La méthode de composition adoptée pour la formulation du béton et du béton à fibres de cette étude est la méthode de BARON-LESAGE. Cette méthode semble la mieux adaptée à la formulation des bétons à fibres puisqu'elle se base sur la maniabilité, propriété essentiellement, influencée par la présence des fibres.

Pour appliquer cette méthode, il faut connaître le dosage en granulats de sorte que le squelette minéral soit optimal. Par conséquent d'après BARON-LESAGE [24 ] deux hypothèses doivent être respectées.

- Pour un dosage en eau et en ciment fixé au départ, le béton le plus maniable est le plus compact et son squelette est optimal.
- Le dosage optimal en granulats ne dépend pas des teneurs en eau et en ciment.

Pour la composition optimale d'un béton, plusieurs paramètres peuvent être étudiés: le dosage en ciment, le dosage en eau ou le dosage en granulats (s/g= sable/gravier) .

Afin de simplifier l'étude et satisfaire les principes de la méthode, seul le rapport s/g est variable. Le dosage en ciment ainsi que le rapport eau/ciment (e/c) sont fixés au départ.

### **II.2.2.2. Etapes de calcul**

Les étapes à suivre pour la composition optimale d'après la méthode de BARON-LESAGE sont :

#### ***1-Choix du dosage en ciment***

Le dosage en ciment, généralement adopté dans la composition des bétons pour bâtiments et ouvrages d'art se situe entre 300 et 450 kg/m<sup>3</sup> .

Dans notre étude, on a opté pour un dosage de 400 kg/m<sup>3</sup>. Celui-ci donne un mélange plus maniable avec un bon enrobage des granulats par le ciment. Ce choix est en bonne concordance avec les justifications bibliographiques.

En effet le dosage en ciment dépend essentiellement des dimensions maximales des granulats (Dmax), ainsi que la nature de l'ouvrage. L'étude expérimentale de l'influence de Dmax sur le dosage en ciment C conduit à l'équation suivante.

$$C_{opt} = (730 \pm 50) / D_{max}^{1/5} \quad (II.1)$$

C<sub>opt</sub> : dosage optimal en ciment exprimé en kg/m<sup>3</sup> :

D<sub>max</sub> : dimension du plus gros granulats (en mm)

La dimension du plus gros granulats utilisé dans cette recherche est :

D<sub>max</sub> = 15mm, ce qui donne un dosage en ciment dans la gamme suivante:

$$395 \text{ kg/m}^3 \leq C_{opt} \leq 454 \text{ kg/m}^3 \quad (II.2)$$

Nous avons optés pour un dosage en ciment de **400 kg/m<sup>3</sup>** qui semble à priori justifié.

## ***2- Choix du rapport eau/ciment (e /c)***

Il est apparu depuis les travaux de FERET, que les résistances mécaniques d'un béton compact sont des fonctions décroissantes du rapport e/c (eau/ciment). Pour obtenir des résistances suffisantes, on se fixe en général une limite supérieure de ce rapport, soit  $e/c \leq 1.5$  en volume. La teneur en eau sera fixée à priori de telle sorte que: **e/c = 1,5**.

## ***3-Détermination des compositions granulaires optimales***

D'après F. GORISSE [24] le rapport s/g (sable/gravier) optimal est compris entre 0,5 et 0,83. Quatre valeurs du rapport s/ g ont été alors choisies et expérimentées dans cette étude,

Soit: s/g = 0.5 - 0.6 - 0.7 - 0.8.

Connaissant le rapport  $s/g$ , il est alors possible de calculer les proportions de chaque composant.

En respectant les étapes de calcul définies par BARON-LESAGE, le calcul se résume en ce qui suit:

### 11.2.2.3.Exemple de calcul pour $s/g=0.5$

Le dosage en ciment est fixé à  $400 \text{ kg/m}^3$ . La proportion en ciment 'c' est donnée par la formule :  $c = C / \varphi_c$

$$C = \text{dosage en ciment} = 400 \text{ kg/m}^3$$

$$\varphi_c = \text{masse volumique absolue du ciment} = 3120 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 400/3120 = 0,13 . \quad \text{Proportion en ciment}$$

Le rapport eau/ciment est pris égale à 1.5 en volume.

$$e/c = 1,5 \rightarrow e = 0,195 \quad \text{Proportion en eau}$$

Ainsi le dosage en eau est égal à :  $E = e \cdot 1000 = 195 \text{ kg/m}^3$

$\varphi_e = 1000 \text{ kg/m}^3$  représente la densité de l'eau .

Vu que la compacité du béton est supposée égale à l'unité avec un minimum d'eau, ' on doit avoir :

$$e + c + s + g = 1$$

$$s + g = 1 - (e + c)$$

$$s + g = 1 - (0,195 + 0,13)$$

$$= 0,675$$

Connaissant ainsi le rapport  $s/g$  et la somme  $s + g$ , on peut déterminer chaque proportion :

$$s + g = 0,675 \quad \text{et} \quad s/g = 0,5$$

Alors:

$$s = 0,225 \quad (\text{proportion en ciment})$$

$$\text{et } g = 0,45 \quad (\text{proportion en gravier})$$

$$s + g = 1 - (e + c)$$

$$s + g = 1 - (0,195 + 0,13) = 0,675$$

Connaissant ainsi le rapport  $s/g$  et la somme  $s + g$ , on peut déterminer chaque proportion :

$$s + g = 0,675$$

$$s / g = 0,5$$

Alors:

$$s = 0,225 \quad (\text{proportion en ciment}) \quad \text{et} \quad g = 0,45 \quad (\text{proportion en gravier})$$

Donc :

- dosage en ciment      400  $\text{kg/m}^3$
- dosage en eau          195  $\text{kg/m}^3$
- dosage en gravier      1196,55  $\text{kg/m}^3$
- dosage en sable        594,225  $\text{kg/m}^3$

Ces quatre rapports (  $s/g = 0.5 - 0.6 - 0.7 - 0.8.$  ) correspondent à quatre compositions différentes. Pour chaque composition, on mesure l'affaissement au cône d'ABRAMS. La composition donnant le plus grand affaissement au cône correspond à la composition optimale.

Le tableau (II.14) récapitule les différentes compositions obtenues pour les différents rapports 's/g'.

**Tableau II.14.** Composition calculée en fonction des différents rapports S / G

S/G	EAU	Ciment (kg/m3)	Sable (kg/m3)	Gravier (kg /m3)
0, 5	195	400	594 ,225	1196,55
0 ,6	195	400	668,173	1122,098
0, 7	195	400	734,196	1055,623
0, 8	19 5	400	792,3	997,125

## II.2.3 Différentes mesures

### II.2.3.1. Mesure de l'ouvrabilité

L'ouvrabilité est évaluée à l'aide du cône d'Abrams, selon la norme NF P18.451.



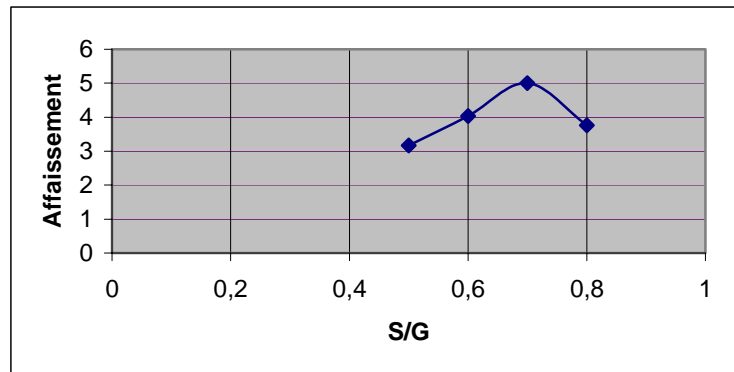
**Figure II.3.** Mesure de l'affaissement à l'aide du Cône d'ABRAMS

Les différentes mesures de l'affaissement au cône pour chaque composition correspondante à un rapport S / G sont regroupés dans le tableau II.15 .

**Tableau II.15.** Affaissement en fonction du rapport S / G

S /G	Affaissement (cm)	Moyenne (cm )
0, 5	3 - 3,4 -3,1	3,17
0 ,6	4,0 - 3,9 -4,2	4,03
0, 7	5,3- 4,9 - 4 ,8	5 ,00
0, 8	3,7 - 4,0- 3,6	3,76

La variation de la maniabilité exprimée en affaissement au cône d'Abrams en cm en fonction du rapport s/g est illustrée par la figureII.4



**Figure II.4.** Affaissement au cône d'abrams pour chaque composition

De la courbe, la maniabilité maximale est atteinte pour un rapport s/g égal à 0,7. Ce résultat est en bonne concordance avec celui trouvé par d'autres chercheurs [28 - 29] sur un béton similaire.

### II.2.3.2. Poids des fibres incorporées

Poids des différentes fibres (fibres d'acier et fibres de verre), incorporées, dans une éprouvette en fonction de pourcentage choisis sont donnés au tableau II.16 .

**Tableau II.16.** Poids des fibres incorporées

Poids des fibres	Fibres de verre (gr )		Fibres d'acier (g)	
	1	1	1,5	1,5
%des fibres en volume	1	1	1,5	1,5
Moule prismatique	163	244,49	470,87	706,305
Moule cylindrique	191	286,48	551,75	827,63

## **II.2.4. Procédure de malaxage**

### **II.2.4.1. Caractéristique propre du malaxeur**

Les mélanges sont réalisés avec un malaxeur à axe vertical et pales constituées par des plaques, de capacité de 65 litres, ce type de malaxeur est très efficace et fournit, dans la plupart des cas, un béton très homogène, il permet pendant le malaxage d'observer la plasticité du béton et de corriger le dosage en eau si nécessaire. La plasticité est généralement vérifiée au cône d'Abrams.



**Figure II.5.** Malaxage du béton

### **II.2.4.2. Séquence de malaxage**

L'introduction des constituants reste quelque peu artisanale, notamment pour les fibres qui sont introduites à la main courante. La séquence de malaxage adoptée, se décompose comme suit :

- Introduction du sable, ciment et des graviers pour un temps de malaxage de 60 secondes.
- Introduction de l'eau pour un temps de malaxage de 40 secondes.
- Pour le mélange en béton composite ; celles-ci sont introduites en dernier à la main, par petites quantités ; pour éviter la formation d'oursins. A chaque ajout, il y a malaxage

pendant 20 secondes, l'opération est répétée jusqu'à l'introduction totale de la quantité des fibres à incorporer.

## **II.2.5. Procédure de préparation des éprouvettes et de mise en œuvre**

### **II.2.5.1. Séquences de préparation**

Pour la compression simple et pour la flexion à quatre points, nous avons choisis respectivement, des éprouvettes cylindriques 16x32 cm (h x d) et prismatiques 14x14x56 cm (largeur x hauteur x longueur) conformément aux normes NF P18.400 et NP 18.409 béton avec fibres métalliques.

Le remplissage des moules 16x32 cm et 14x14x56 cm est réalisé en deux couches pour le béton sans fibres, par contre pour le béton armé de fibres métalliques, l'introduction est faite en trois phases égales. Le remplissage des moules est effectué à l'aide d'une pelle à coque cylindrique du malaxeur –moule.

Les différentes phases de l'opération s'accompagnent d'une vibration externe à l'aide d'une table vibrante jusqu'au remplissage du moule, puis à la fin de l'opération, on procède au lissage avec une truelle. La durée de vibration est généralement comprise entre 15 et 60 secondes. Figure II.6.

#### **Remarque :**

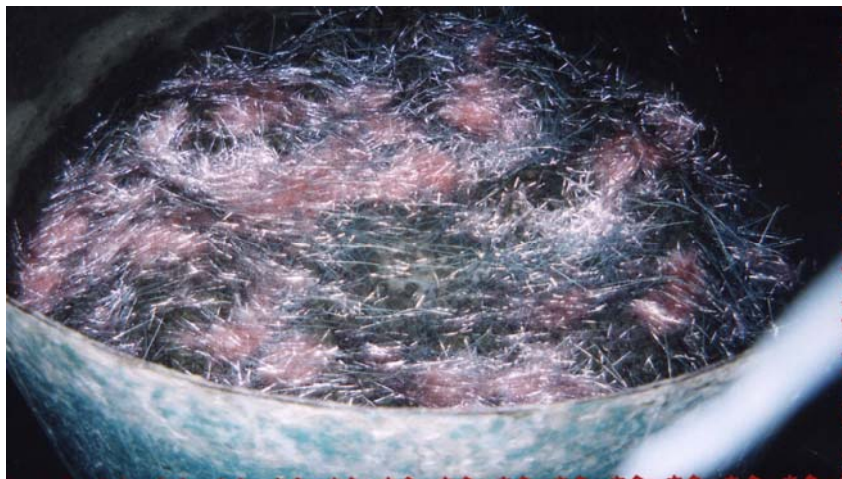
Lors de préparation des éprouvettes prismatiques, le remplissage de béton composite est limité juste pour la partie tendue. Vu l'indisponibilité de ces fibres en quantité suffisante.



A- Malaxage du béton sans fibres



B- Ajout de fibres d'acier



C- Ajout de fibres de verre

**Figure II.6.** Séquences de préparation du béton composite

**Tableau II.17.** Indexation des éprouvettes

<b>BTC</b>	Béton témoin (sans fibre) pour compression
<b>BTF</b>	Béton témoin (sans fibres) pour flexion
<b>BCIComp</b>	Béton composite (fibre de verre et d'acier pour compression à raison de 1% par rapport au volume)
<b>BCI Flexion</b>	Béton composite (fibre verre et d'acier pour flexion à raison de 1% par rapport au volume)
<b>BCII.Comp</b>	Béton composite (fibre de verre et d'acier pour compression à raison de 1,5% par rapport au volume)
<b>BCII Flexion</b>	Béton composite (fibre de verre et d'acier pour flexion à raison de 1,5% par rapport au volume)

### II.2.5.2. Affaissement en fonction du type de béton

L'ouvrabilité est évaluée à l'aide du cône d'Abrams, en mesurant l'affaissement selon la norme NF P18.451. En mesurant l'affaissement, (Tableau II.18), nous constatons que celui-ci diminue lorsque le pourcentage des fibres augmente.

**Tableau II.18.** Affaissement au cône d'Abrams

Type de béton	Affaissement (cm)
BT	5
BCI	4,3
BCII	3,5



**A- remplissage de béton composite**



**B - Vibration des moules prismatiques**



**C - Vibration des moules cylindriques**

**FigureII.7.** Remplissage béton dans les moules

Après 24 heures, les corps d'éprouvettes sont démoulés. Pour les éprouvettes du béton ordinaire (sans fibres), elles seront conservées par la suite dans des bacs remplis d'eau à une température de 20° C, par contre les éprouvettes du béton armé de fibres ; elles seront conservées à l'air libre dans des conditions ambiantes du laboratoire (température à 20°C).

### II.2.5.3.Types d'éprouvettes réalisées

On a réalisé dix-huit (18) éprouvettes :

- ✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton témoin (sans fibres) .
- ✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton composite BCI (1 % Fv + 1 % Fa) .
- ✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton composite BCII (1,5 % Fv + 1,5 % Fa) .



Figure II.8. Béton composite BCI (1 % Fv + 1 % Fa)



Figure II.9. Béton composite BCII (1,5 % Fv + 1,5 % Fa) .

## II.2.6. Conclusion du chapitre

Dans cette étude expérimentale d'élaboration et de préparation des éprouvettes d'essais, on s'est intéressé dans la première partie à l'identification physique, chimique et mécanique des différents constituants du béton composite.

Cette identification a permis de déterminer les propriétés intrinsèques à savoir : la distribution granulaire, l'équivalent du sable, le retrait, la nature des fibres.

Dans la deuxième partie, une élaboration est menée sur des éprouvettes en béton avec des fibres d'acier et de verre, nous avons fait varier le pourcentage en volume (1% et 1,5%).

On a réalisé dix-huit (18) éprouvettes :

✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton témoin (sans fibres) .

✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton composite (1 % Fv + 1 % Fa) .

✚ Trois (3) moules prismatiques et trois moules cylindriques pour béton composite (1,5 % Fv + 1,5 % Fa) .

Les dimensions des moules sont les suivants :

- Prismatiques : 14 \* 14 \* 56 cm
- Cylindriques : 16\*32 cm

Dans le chapitre qui suit, une analyse expérimentale sera menée, portant sur les essais de caractérisation du comportement mécanique en compression centrée et en flexion quatre points, dans le but de mettre en exergue l'intérêt de l'incorporation de fibres combinées dans la matrice cimentaire pour améliorer son mode de déformation et par conséquent son mode de rupture.

### **Remarque :**

La limitation en pourcentage des fibres) incorporer est conditionnée par le manque de matières premières et les difficultés de réalisation des éprouvettes.

## III. Analyse expérimentale du mode de comportement des bétons composites

### III.1. Introduction

Pour décrire et caractériser le mode de comportement mécanique des bétons composites, les différentes éprouvettes réalisées ont été soumises aux différents essais mécaniques et en particulier les essais de flexion quatre points et de compression centrée .

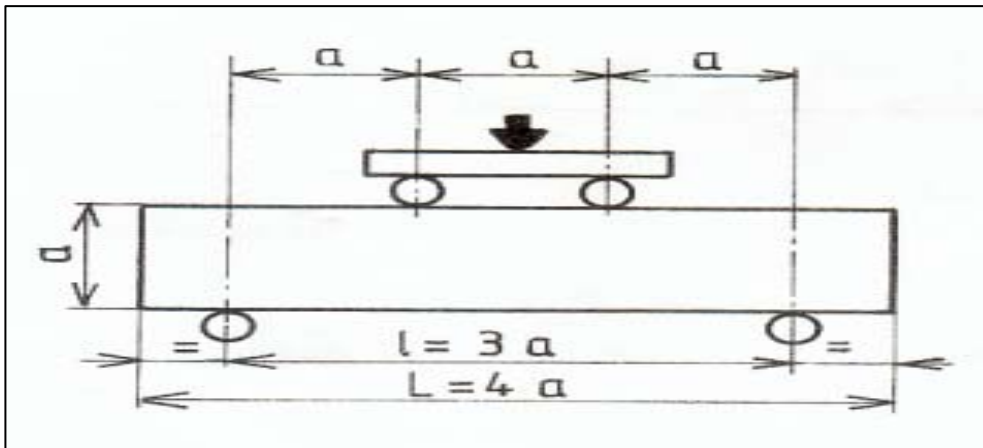
Les essais ont été menés au niveau du laboratoire LMMC de Boumerdes et au niveau du CETIM- Boumerdes.

### III.2. Essais mécaniques

#### III.2.1. Essai de résistance à la traction par flexion

[NF P18-407]

L'essai est mené en flexion quatre points conformément à la norme NF P18.407. Les corps d'épreuves sont de formes prismatiques de dimensions géométriques de 14\*14\*56cm . L'éprouvette repose sur deux appuis distants de 42 cm et soumise à une charge verticale, appliquée au milieu de la travée centrale figure III.1.



**Figure III.1.** Dispositif de chargement

- a : arête =14 cm,  $I = 3201.33 \text{ cm}^4$
- L : longueur de l'éprouvette =56 cm
- I : distance entre appui = 42 cm

### III.2.1.1. Eprouvettes soumises à l'essai, après 28 jours de coulage.

La machine d'essai est une presse hydraulique 'TONI TECHNIK' de capacité maximale 100KN, ( la vue du dispositif d'essai est donnée à la figure III.2 ).La charge est appliquée progressivement à la vitesse de chargement contrôlée et ce, jusqu'à la rupture

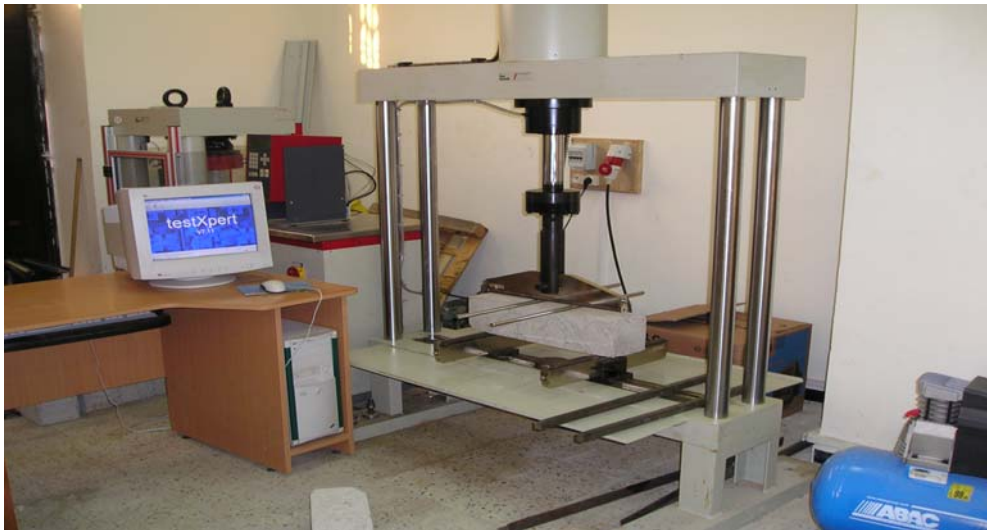


Figure III.2. Machine d'essai

En général, la rupture a lieu dès qu'apparaît la fissure magistrale parallèle à l'effort appliqué, au bas de la zone médiane de la poutre, qui se propage vers le haut. La contrainte de rupture se déduit par application des formules issues de la théorie de la poutre sur quatre appuis simples. Pour chaque type de béton, la courbe charge- flèche est enregistrée.

### III.2.1.2. Mode de rupture par flexion selon la composition

#### III.2.1.2.1. Cas du béton témoin

- La rupture du béton témoin est fragile, lorsque la limite de résistance est atteinte, on observe une rupture brutale, ceci est expliqué par la faible résistance du béton seul aux efforts de traction développés dans la zone tendue de l'élément fléchi. Cette rupture est illustrée dans la figure III.3a.

- Concernant la structure, on observe une répartition plus ou moins parfaite des grains dans la masse (structure homogène) figure III.3b



**Figure III.3.a.** Rupture du béton témoin  
(Rupture fragile à mi-portée)



**Figure III.3.b.** Structure interne  
(Répartition granulaire)

#### III.2.1.2.1. Cas du béton composite à renfort combiné BCI (1%Fv + 1% Fa)

Le mode de rupture observé sur les éprouvettes en béton composite à renfort combiné de fibres de verre et d'acier à raison de 1% chacun du volume de la matrice béton, présente une amélioration sensible concernant l'amorce des microfissures, la vitesse de propagation des fissures Figure III.4. Ceci est expliqué par la présence des fibres dont le rôle est de coudre les microfissures et de gêner le développement rapide de l'ouverture de la fissure magistrale.



**Figure III.4.** Mode de rupture ductile

### III.2.1.2.2. Cas du béton composite à renfort combiné BCII (1,5%Fv + 1,5% Fa)

Pour les éprouvettes en béton composite avec un renfort de 1,5% chacun en volume de la matrice béton, on observe d'une part, une rupture plus ductile par présence d'une fissure magistrale d'épaisseur moindre au niveau des appuis et d'autre part une densification des microfissures sur toute la facies normale de l'élément fléchi. Ceci est expliqué par la forte teneur du renfort dans la matrice béton. Figure III.5.



**Figure III.5.** Densification de fissures et rupture ductile

### III.2.1.2. Résultats des essais selon la composition

Les différents résultats obtenus lors de l'essai de flexion quatre points, en particulier la variation de la flèche (courbure) en fonction de la charge et les résistances, sont donnés dans le tableau III.1, III.2, III.3, III.4 et III.5 et sont illustrés dans les figures III.6, III.7, III.8 et III.9.

**Tableau III.1.** Résultats effort- flèche des différents types de bétons

	Type de béton		
	BT	BC I	BCII
Force (KN)	Flèche (mm)		
2	0.02	0.02	0.02
4	0.06	0.16	0.08
6	0.06	0.23	0.10
8	0.08	0.27	0.22
10	0.08	0.33	0.42
12	0.10	0.40	0.60
14	0.12	0.53	0.73
16	0.12	0.61	0.80
18	0.15	0.53	0.89
20	0.16	0.61	0.92
22	0.17	0.69	1.11
24	0.18	0.77	1.20
26	0.19	0.81	<b>26.77=1.22</b>
28	0.2	<b>27.16=0.83</b>	-
29	<b>28.32=0.22</b>	-	-

**BCI** : Béton composite avec 1% de fibres de verre et 1% de fibres d'acier

**BCII** : Béton composite avec 1,5% de fibres de verre et 1,5% de fibres d'acier

**Tableau III.2.** Essai de flexion à 04 points sur béton témoin

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm <sup>2</sup> )	Contrainte (MPa)
<b>BT</b>	14x14x56	28	26.89	2.450	29.98	196	4.588
	14x14x56	28	26.932	2.453	26.38	196	4.037
	14x14x56	28	26.972	2.457	28.62	196	4.380

**Tableau III.3.** Essai de flexion à 04 points sur béton composite BCI

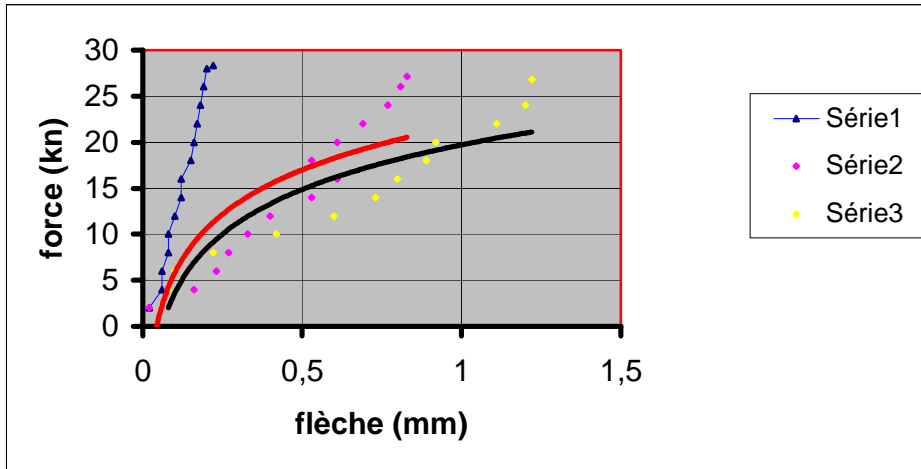
Type de béton	Format (cm)	Age (j)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm <sup>2</sup> )	Contrainte (MPa)
<b>BCI</b>	14x14x56	28	26.141	2.381	26.58	196	4.068
	14x14x56	28	25.687	2.340	26.62	196	4.074
	14x14x56	28	25.835	2.354	27.11	196	4.149

**Tableau III.4.** Essai de flexion à 04 points sur béton composite BCII

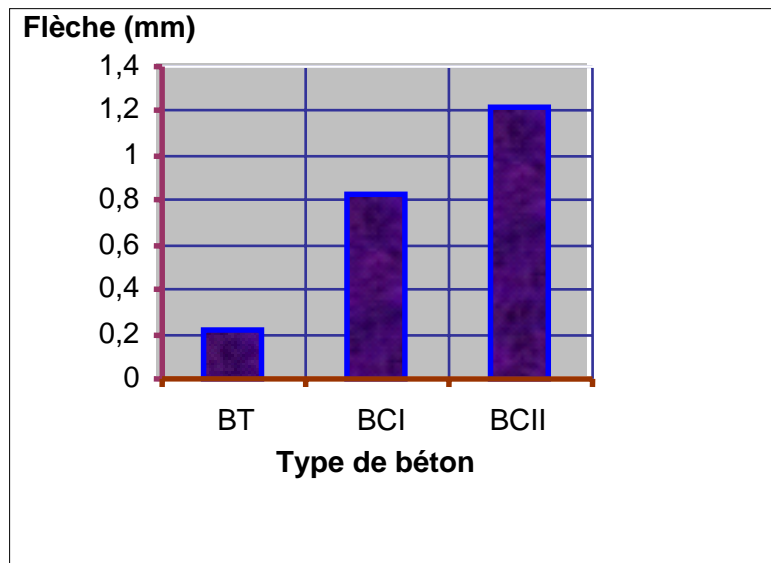
Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm <sup>2</sup> )	Contrainte (MPa)
<b>BCII</b>	14x14x56	28	26.234	2.390	26.12	196	3.997
	14x14x56	28	25.991	2.368	27.62	196	4.227
	14x14x56	28	24.834	2.262	27.75	196	4.247

**Tableau III.5.** Force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton

Type de béton	F rupture (KN)	Flèche à la rupture f <sub>r</sub> (mm)
<b>BT</b>	28.32	0.22
<b>BCI</b>	27.16	0.83
<b>BCII</b>	26.77	1.22



**Figure III.6.** Diagramme force – flèche selon la composition  
 Série 1 : Béton témoin, série 2 : BCI et série 3 : BCII



**Figure III.7.** Flèche à la rupture selon la composition

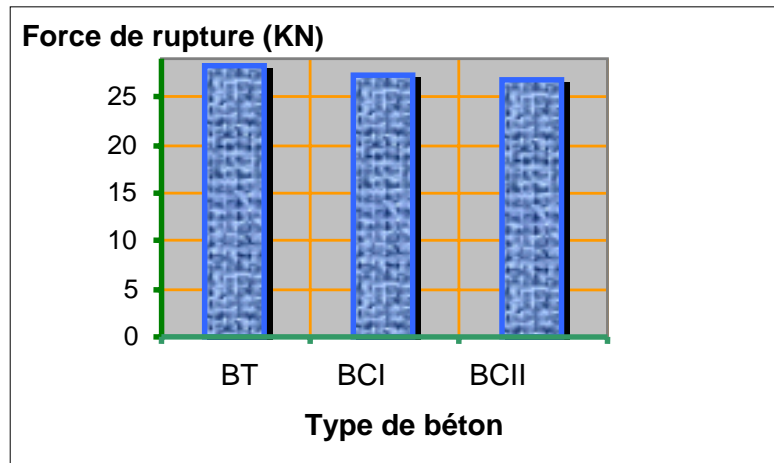


Figure III.8. Force de rupture selon la composition

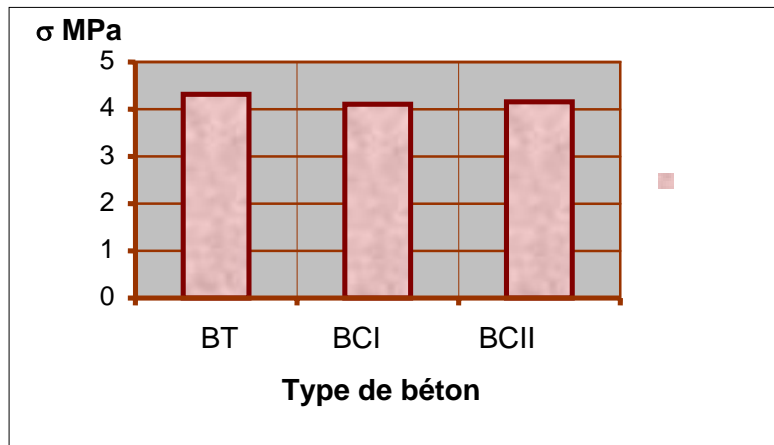


Figure III.9. Variation de la contrainte à la flexion selon la composition

### III.2.2. Essai de résistance à la compression

#### [NF P18-406]

Les corps d'épreuves sont des cylindres dimensions standard ( $\varnothing 16$ , h 32 cm). Ils sont soumis à l'essai, 28 jours après le coulage. Les éprouvettes sont disposées entre deux plateaux de la presse hydraulique 'TONI TECHNIK' dont la capacité est de 3000 KN. Son plateau supérieur est mobile de telle sorte à épouser la surface de l'éprouvette.



**Figure III.10.** Bâti de compression

### III.2.2.1. Préparation des éprouvettes d'essai

Les faces extrêmes de l'éprouvette doivent être rectifiées par abrasion ou par coulage d'une couche de soufre liquide (NF P18-416) pour éviter toute excentricité des charges appliquées figure III.11.a.

Des jauges extenso métriques sont collées sur la face latérale des éprouvettes. Elles sont reliées à une chaîne de mesures .Pour chaque étape de chargement, la valeur de l'effort vertical ainsi que la déformation correspondante sont directement enregistrées figure III.11.b.

**Figure III.11.a.** Rectification des faces**Figure III.11.b.** Collage de la jauge

L'effort vertical est appliqué progressivement à une vitesse de chargement constante de 0.50 KN par seconde et ce, jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette figure III.12.

**Figure III.12.** Mode d'essai et rupture de l'éprouvette

### III.2.2.2. Résultats des essais selon la composition

Les différents résultats obtenus lors de l'essai de compression centrée, en particulier la variation des déplacements longitudinaux en fonction des efforts appliqués et les résistances, sont donnés dans les tableaux III.6, III.7, III.8, III.9 et III.10 et sont illustrés dans les figures III.13, III.14, III.15 et III.16.

**Tableau III.6.** Résultats effort - déplacement longitudinal des différents bétons

	Type de béton		
	BT	BCI	BCII
Force (KN)	Flèche ( $10^{-3}$ mm)		
10	0.016	0.130	0.226
20	0.031	0.245	0.283
30	0.100	0.337	0.445
40	0.216	0.426	0.669
50	0.369	0.510	0.904
60	0.590	0.844	1.143
70	0.688	1.12	1.359
80	0.785	1.249	1.56
90	0.89	1.320	1.728
100	1.009	1.592	1.785
120	1.149	1.800	1.899
140	1.405	1.940	2.140
160	1.564	2.000	2.380
180	1.812	2.320	2.590
200	2	<b>2.670</b>	2.650
210	<b>2.11</b>	-	<b>2.720</b>

**Tableau III.7.** Résultats obtenus pour béton témoin

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique ( $g/cm^3$ )	Résistance en compression simple		
					Force (KN)	Section ( $cm^2$ )	Contrainte (MPa)
BT	16x32	28	14.895	2.316	213	200,96	10.60
	16x32	28	15.006	2.333	208	200,96	10.35
	16x32	28	14.912	2.319	209	200,96	10.40

**Tableau III.8.** Résultats obtenus pour béton composite BCI

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en compression simple		
					Force (KN)	Section (Cm <sup>2</sup> )	Contrainte (MPa)
<b>BCI</b>	16x32	28	13.330	2.073	180	200,96	08.95
	16x32	28	13.305	2.069	220	200,96	10.64
	16x32	28	13.324	2.072	200	200,96	09.95

**Tableau III.9.** Résultats obtenus pour béton composite BCII

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	Masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance en compression simple		
					Force (KN)	Section (Cm <sup>2</sup> )	Contrainte (MPa)
<b>BCII</b>	16x32	28	13.604	2.115	190	200,96	09.45
	16x32	28	13.639	2.121	220	200,96	10.64
	16x32	28	13.700	2.130	210	200,96	10.45

**Tableau III.10.** Force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton

Type de béton	F rupture (KN)	Flèche à la rupture $f_r$ (10 <sup>-3</sup> mm)
Béton témoin <b>BT</b>	210	2.00
Béton composite <b>BCI</b>	200	2.67
Béton composite <b>BCII</b>	210	2.72

**BCI** : Béton composite avec 1% de fibres de verre et 1% de fibres d'acier

**BCII** : Béton composite avec 1,5% de fibres de verre et 1,5% de fibres d'acier

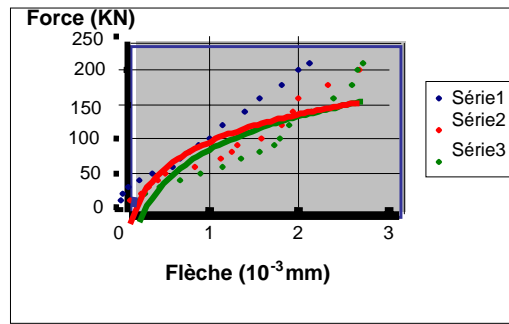


Figure III.13. Diagramme force – flèche pour les différents types de béton  
Série 1 : Béton témoin, série 2 : BCI et série 3 : BCII

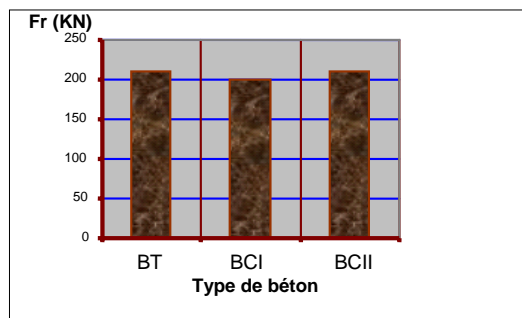


Figure III.14. Variation de la force de rupture la compression selon la composition

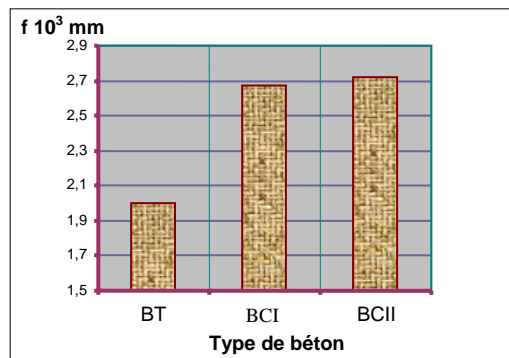


Figure III.15. Variation de la flèche à la rupture selon la composition

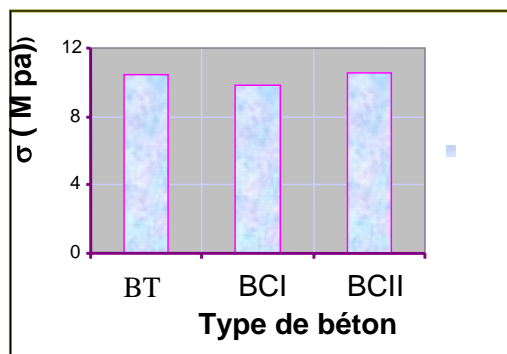


Figure III.16. Variation de la contrainte selon la composition

### III.3. Analyse des résultats et conclusion

L'analyse des résultats obtenus expérimentalement permettent d'en déduire que :

-lors des essais mécaniques, le mode de rupture de l'élément en béton seul ( béton témoin ) est de type fragile (rupture brutale) ceci est du à sa faible résistance à la traction, Alors que pour les bétons composites à différents teneurs en fibres, on a observé une rupture ductile avec une densification des microfissures , la rupture est obtenue après l'apparition de la fissure magistrale au niveau des appuis, Ceci s'explique par l'ajout de fibres de verre et d'acier dont le rôle est de stopper la propagation rapide des fissures en les cousant (après formation des fissures, les lèvres sont toujours reliés par les fibres par effet de goujon)

-Les résistances en compression simple sont peu affectées par la présence des fibres.

- L'ouverture de la fissure est largement réduite quand on passe d'un dosage en fibres à un autre. La vitesse de propagation des fissures est nettement inférieure à celle obtenue dans le béton témoin. Donc les fibres ont améliorés le comportement post fissuration du béton.

- Les rapports de flèche sont de l'ordre de 3.77 ; 5.54 respectivement selon le taux de fibres incorporées de 1 % pour BCI et de 1.5 % pour BCII, par rapport au béton témoin ordinaire (sans fibres)

- les résistances ne sont pas améliorées et parfois même, on observe une diminution de leurs valeurs, ceux-ci peut s'expliquer par :

\*la nature des fibres utilisées possédant des résistances mécaniques faibles à savoir l'acier très déformable et des fibres de verre en filaments très fins

\*les fibres courtes de verre, vu leur nature ont présentés une mauvaise résistance aux attaques alcalines, donc ce type de fibres n'intervient pas sur les résistances.

\*la teneur des fibres était minimale.

Cependant vu que l'amélioration des résistances par incorporation dans la matrice béton, des fibres de performances mécaniques avérées étant largement développée et étudiée, notre approche conceptuelle a porté sur l'amélioration du mode de rupture fragile du béton ordinaire en lui conférant une plus grande ductilité, à travers le contrôle des mécanismes de fissuration.

Donc la combinaison de fibres à incorporer dans la matrice béton donnant naissance aux bétons composites, permet de conjuguer les performances de chaque constituant et de répondre aux conditions d'exploitation du matériau conçu. A cet effet, notre étude confirme que l'utilisation de fibres de résistances faibles permet de modifier le mode de comportement jusqu'à rupture des bétons. Le recours à cette approche de formulation est tributaire du prix de revient (étude économique).

En perspective, nous suggérons d'utiliser, après d'autres investigations plus détaillées du comportement mécanique en faisant varier les teneurs, en choisissant des fibres à compatibilité mécanique assurée, en homogénéisant la structure, ..., dans les dallages, tels que les dalles des pistes d'aérodrome soumises au poinçonnement.

## **Chapitre IV. Modélisation du comportement à la rupture du béton composite**

### **IV.1. Introduction**

La première étape d'un calcul béton composite consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau en fonction de celles de ses composants. Dans la plupart des cas, ces calculs se réduisent uniquement au calcul de la contrainte et du module d'Young. Il existe divers modèles d'homogénéisations pour l'obtenir.

La multiplicité des théories employées pour les matériaux composites correspond aux infinités de combinaisons et de caractéristiques possibles, sachant que chaque composite ne possède pas un modèle propre mais des spécificités qui sont habituelles à certains types de modélisation (caractère ductile ou rigide, porosité, nature du renfort, géométrie). Ces remarques sont d'autant plus valables si l'on prend en considération le comportement de rupture des bétons composites.

La modélisation d'un matériau est un moyen de transcrire son comportement et les lois qui le régissent. Il existe de nombreuses possibilités de modélisation qu'elle soit analytique, numérique, rhéologique, statistique et autres.

### **IV.2. Modélisation d'un matériau composite**

La connaissance des diverses approches de modélisation, choisies par les nombreux auteurs qui se sont préoccupés des matériaux composites, peut sembler un peu fastidieuse. Néanmoins, il nous paraît indispensable de présenter ces nombreuses possibilités qui traduisent à la fois l'intérêt, la complexité du matériau et aussi les difficultés rencontrées lors de la modélisation de phénomènes réels.

## IV.2. 1. Notion du volume élémentaire représentatif

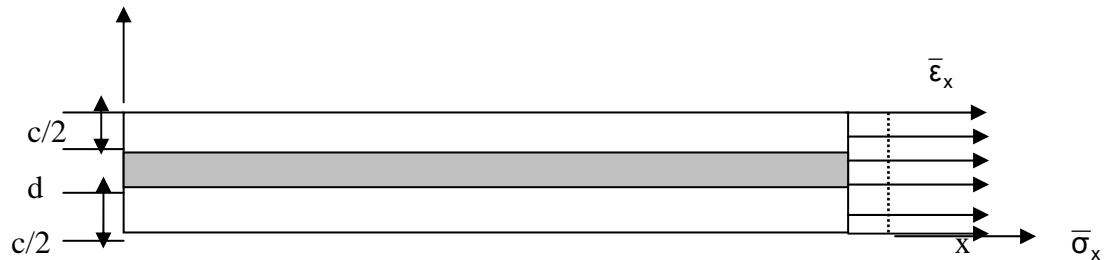
La démarche générale du calcul d'homogénéisation consiste donc à déterminer les champs de contrainte et de déformation au sein du VER. A partir de là ; il sera possible de calculer la contrainte moyenne dans la direction quelconque 'i' de l'élément de volume.

$$\text{Soit, } \bar{\sigma}_i = \frac{1}{V} \int_V \sigma_i dV \quad \text{avec } i = 1 \dots 6 \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{De la même façon, on obtient la déformation moyenne, } \bar{\epsilon}_i = \frac{1}{V} \int_V \epsilon_i dV \quad (\text{IV.2})$$

A partir des valeurs moyennes obtenues par les V.E.R théoriquement il est possible de déterminer les propriétés élastiques du matériau homogénéisé, en considérant un modèle géométrique simple et idéalisé. En pratique, dans les calculs de l'ingénieur, des approches plus simples sont proposées, basées sur la notion de la loi de mélange.

Considérant le schéma simplifié d'une traction longitudinale , donné par la figure IV.1



**Figure IV.1.** Schéma simplifié d'une traction longitudinale

$$V_f = d / (c+d)$$

$V_f$ : fraction volumique des fibres dans la matrice

En utilisant les deux précédentes expressions (IV.1) et (IV.2), on peut écrire :

$$\bar{\sigma}_x = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \bar{\sigma}_x dv + \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \bar{\sigma}_x dv \quad (\text{IV.3})$$

Avec :  $\bar{\sigma}_x$  : Contrainte moyenne de traction dans le volume élémentaire représentatif

$$\text{En posant : } \bar{\sigma}_{fx} = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \bar{\sigma}_x dv. \text{ et } \bar{\sigma}_{mx} = \frac{1}{V_m} \int_{V_m} \bar{\sigma}_x dv \quad (\text{IV.4})$$

où :  $\bar{\sigma}_{fx}$  et  $\bar{\sigma}_{mx}$  sont respectivement les contraintes moyennes de la fibre et de la matrice, on peut donc écrire que ;

$$\bar{\sigma}_x = V_f \cdot \bar{\sigma}_{fx} + V_m \bar{\sigma}_{mx} \quad (\text{IV.5})$$

L'hypothèse simplificatrice consiste donc à considérer que la déformation est uniforme et identique dans la fibre et la matrice, soit  $\bar{\epsilon}_x = \bar{\epsilon}_m = \bar{\epsilon}_f$ .

En considérant l'hypothèse du comportement élastique linéaire ( loi de Hooke) pour les deux constituants ( fibre et matrice), on peut écrire :

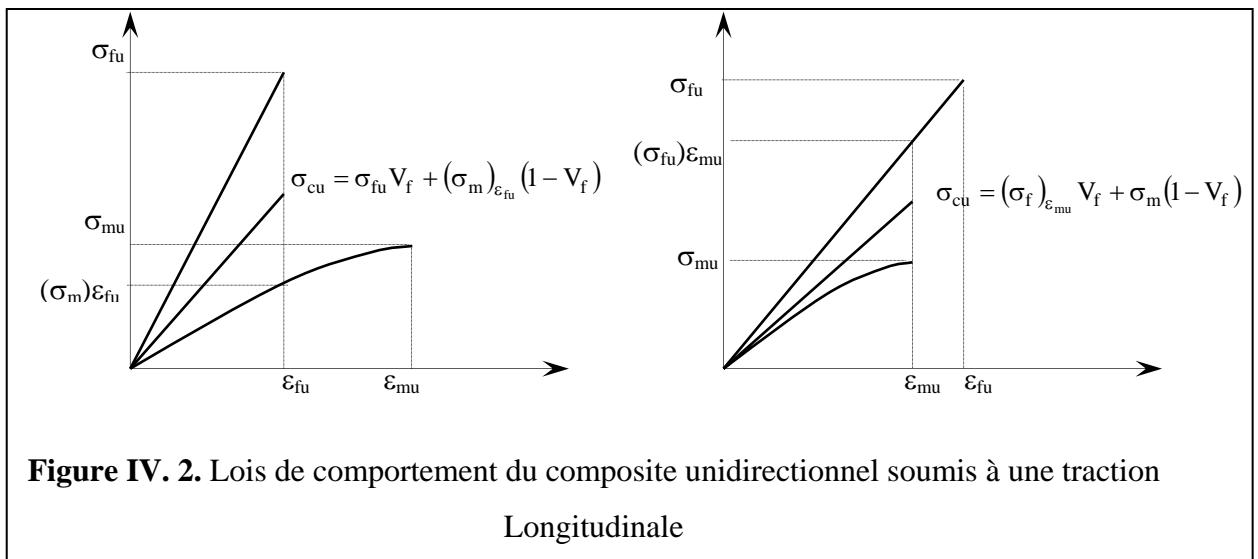
$$\bar{\sigma}_x = (v_f E_f + v_m E_m) \cdot \bar{\epsilon}_x \quad (\text{IV.6})$$

L'expression du module d'Young longitudinal du composite est donc donnée comme suit :

$$E_x = V_f E_f + V_m E_m \quad (\text{IV.7})$$

Cette loi est appelée couramment 'loi de mélange'.

Selon que la déformation ultime de la fibre  $\epsilon_{fu}$  soit supérieure ou inférieure à la déformation ultime de la matrice  $\epsilon_{mu}$ , on obtient les deux courbes contraintes déformations suivantes (Fig.IV.2) .



Dans la littérature existante, La détermination du module d'élasticité transversal est basée sur

une relation simplifiée qui donne des résultats loin des résultats expérimentaux.

#### a- Cas $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$

La loi des mélanges, nous permet d'écrire au moment de la rupture, que la contrainte dans le composite est égale à :

$$\sigma_{comp.u} = \sigma_{fib.u} V_{fib} + (\sigma_{mat})_{\varepsilon_{fu}} (1 - V_{fib}) \quad (IV.8)$$

Avec :  $\sigma_{comp.u}$  : contrainte dans le composite à la rupture ,  $\sigma_{fib.u}$  : contrainte ultime de la fibre  $V_f$  : fraction volumique des fibres ,  $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$  : contrainte dans la matrice pour une déformation de la fibre à la rupture.

On remarque d'après le graphe que  $(\sigma_{mat})_{\varepsilon_{fu}} < \sigma_{mat.u}$

En admettant l'égalité des déformations dans la fibre et dans la matrice, la relation s'écrit au moment de la rupture :

$$\sigma_{comp.u} = \sigma_{fib.u} \cdot V_{fib} + \sigma_{mat(\varepsilon_{fu})} \cdot (1 - V_{fib})$$

La contrainte  $\sigma_{mat(\varepsilon_{fu})}$  est inférieure à la contrainte à la rupture  $\sigma_{mat.u}$  de la matrice, d'où :

$$\sigma_{comp.u} \leq \sigma_{fib.u} \cdot V_{fib} + \sigma_{mat.u} \cdot (1 - V_{fib})$$

Généralement, l'expression retenue pour la contrainte à la rupture du composite est la loi des mélanges :

$$\sigma_{comp.u} = \sigma_{fib.u} \cdot V_{fib} + \sigma_{mat.u} \cdot (1 - V_{fib}) \quad (IV.9)$$

Avec pour les fractions usuelles de fibres :

$$\sigma_{comp.u} = \sigma_{fib.u} \cdot V_{fib}$$

#### b- Cas $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$

Dans ce cas, au moment de la rupture, la contrainte dans le composite est égale à :

$$\sigma_{cu} = (\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (IV.10)$$

On remarque d'après le graphe que  $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}} < \sigma_{mu}$

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres, lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ( $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$ ), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire.

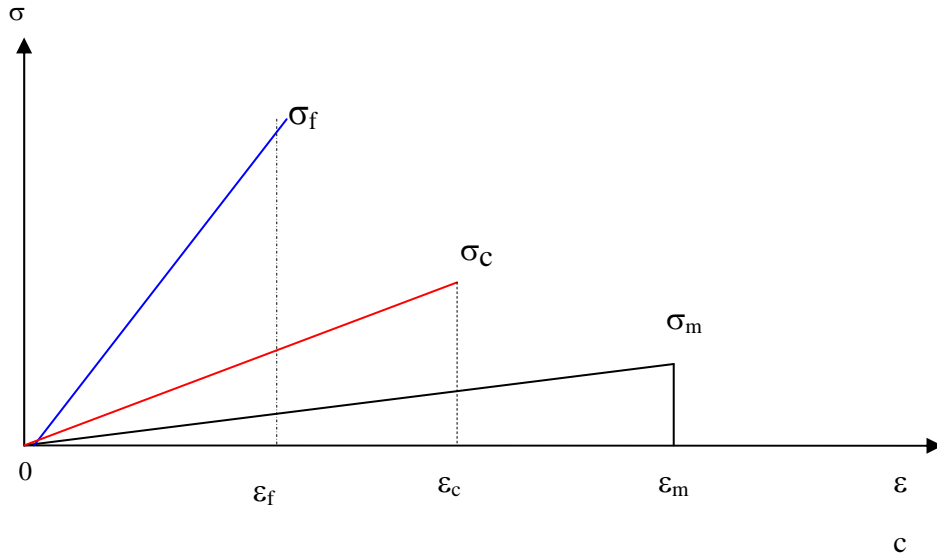
Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres, la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_{comp.u} = \sigma_{fib.(\varepsilon_{mu})} \cdot V_{fib} + \sigma_{mat.u} \cdot (1 - V_{fib}) \quad (IV.11)$$

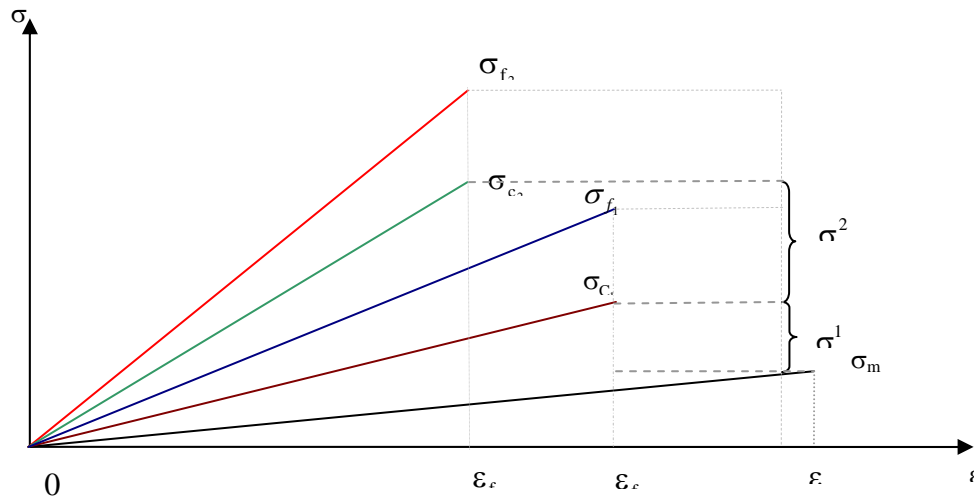
$\sigma_{fib.(\varepsilon_{mu})}$  est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice. La valeur est alors bien inférieure à celle donnée par l'expression. La matrice ne permet pas dans ce cas de bénéficier totalement du renfort des fibres.

### IV.3. Modélisation des constantes élastiques d'un béton composite hybride.

La combinaison de différentes fibres dans la matrice permet de combiner les performances de chacune d'entre elles, de conjuguer l'apport de performances et de concevoir un matériau répondant aux conditions d'exploitation et de service.



**Figure.IV.3.** Lois de comportement des constituants  
Cas d'un composite avec un seul renfort



**Figure.IV.4.** Lois de comportement des composites  
Cas d'un composite hybride avec 'i' renforts

A partir des figures.IV.3 et IV.4, on peut exprimer la contrainte  $\sigma_c$  du composite hybride constitué des fibres  $f_i$  et de la matrice  $m$  en fonction des contraintes respectives  $\sigma_{fi}$  et  $\sigma_m$  des fibres et de la matrice comme suit :

### IV.3.1. Modélisation de la contrainte développée dans un composite soumis à une traction longitudinale

#### IV.3.1.1. Expressions de la contrainte selon le nombre de renforts

Etant donné que notre béton est composite, composé de plusieurs renforts (fibres de verre et métalliques), l'influence des ces ajouts dans la matrice béton est estimée à partir des caractéristiques et des proportions de chacun des constituants sur les résistances nominales.

Rappelant que les modèles à bornes donnent un encadrement du comportement mécanique du matériau composite par des comportements mécaniques limites (bornes).

Nous citerons également le modèle de HASHIN et SHTRIKMAN (1963) dont l'expression des bornes est plus resserrée que Voigt et Reuss ( ajout d'une hypothèse sur la géométrie), ainsi que les approches phénoménologiques données par la description de TAKAYANAGI, en prenant comme hypothèse un paramètre de forme ajustable

A partir des équations d'HALPIN-TSAI, on peut estimer le module d'un composite renforcé par des fibres courtes orientées aléatoirement dans un plan ou dans un volume.

Enfin, l'approche de TSAI-PAGANO, basée sur la théorie de l'élasticité orthotrope

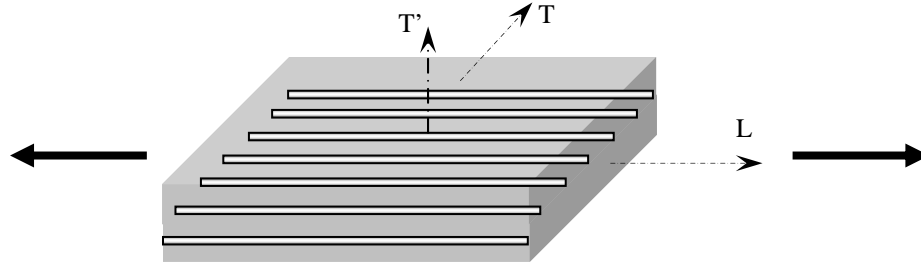
Lors du comportement linéaire, l'adhérence entre les fibres de renfort et la matrice béton est parfaite, l'effort de traction "R<sub>c</sub>" du composite, est donné par les relations suivantes :

$$R_c = R_m + R_F = \Psi \cdot \mu_m \cdot R_m + \varphi \cdot \mu_{F1} \cdot R_{F1} + \xi \cdot \mu_{F2} \cdot R_{F2} \quad \text{IV.12}$$

$\varphi$  ,  $\Psi$ ,  $\xi$  : représentent le taux de travail respectivement des fibres et de la matrice béton,

au stade linéaire, on a :  $\varphi = \Psi = \xi = 1$

Si on considère un composite unidirectionnel sollicité en traction longitudinale.



**Figure IV.5.** Matériau composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

A partir de la figure.IV.5. On peut exprimer la contrainte  $\sigma_c$  du composite constitué des fibres  $f_i$  et de la matrice  $m$  en fonction des contraintes respectives  $\sigma_{f_i}$  et  $\sigma_m$  des fibres et de la matrice comme suit :

$$F = F_f + F_m$$

$$A_c \sigma_c = \xi_f A_f \sigma_f + A_m \sigma_m$$

$$\sigma_c = \xi_f \frac{A_f}{A_c} \sigma_f + \frac{A_m}{A_c} \sigma_m \quad \text{IV.13}$$

$$\sigma_c = \xi_f v_f \sigma_f + (1 - v_f) \sigma_m$$

Cette loi est appelé couramment : loi des mélanges pour les contraintes

Avec :

$\sigma_c$ :contrainte développée dans le composite.,  $\sigma_f$ :contrainte développée dans la fibre,

$\sigma_m$ :contrainte développée dans la matrice.,  $v_f$ :fraction volumique de la fibre f.,

$v_m=(1-v_f)$ :fraction volumique de la matrice.

$\xi$  : Coefficient d'équivalence

**a)- Cas d'une fibre**

Le composite est constitué d'une matrice « m » et d'un seul type de fibre « f<sub>1</sub> »

Donc on aura

$$\sigma_{c_1} = \xi_1 v_{f1} \sigma_{f_1} + (1 - v_{f1}) \sigma_m \quad \text{IV.14}$$

**b)- Cas de deux fibres**

Dans notre approche nous considérons que c'est le matériau homogénéisé (constitué de la matrice et du premier type de fibre) qui transmet la contrainte au deuxième type de fibre. Le matériau est homogénéisé en se basant sur l'approche simplifiée.

Si l'on considère la fibre f<sub>2</sub> entourée d'une matrice m' (matériau homogénéisé). L'approche simplifiée, nous permet d'écrire :

$$\sigma_{c_2} = \xi_{f_2} \sigma_{f_2} v_{f_2} + (1 - v_{f_2}) \sigma_{m'}$$

$$\sigma_{m'} = \xi_{f_1} \sigma_{f_1} v'_{f_1} + (1 - v'_{f_1}) \sigma_m$$

$$v'_{f_1} = \frac{v_{f1}}{v_{f1} + v_m}$$

Avec

v<sub>f1</sub> : fraction volumique de la fibre f<sub>1</sub>

v<sub>f2</sub> : fraction volumique de la fibre f<sub>2</sub>

v<sub>m</sub> = (1 - v<sub>f1</sub> - v<sub>f2</sub>) : fraction volumique de la matrice

σ<sub>c2</sub> : la contrainte développée dans le matériau constitué de la matrice m, de la fibre f<sub>1</sub> et de la fibre f<sub>2</sub>

σ<sub>m'</sub> : la contrainte développée dans le matériau homogénéisé constitué de la matrice m et de la fibre f<sub>1</sub> entourant la fibre f<sub>2</sub>, elle est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_{m'} = \xi_{f_1} v'_{f_1} \sigma_{f_1} + \sigma_m (1 - v'_{f_1})$$

$$v'_{f_1} = \frac{v_{f1}}{v_{f1} + v_m}$$

Avec v'<sub>f1</sub> : fraction volumique de la fibre f<sub>1</sub> dans le matériau homogénéisé

Après développement on obtient la formule suivante

$$\sigma_{c_2} = \xi_{f_1} \sigma_{f_1} v_{f1} + \xi_{f_2} \sigma_{f_2} v_{f_2} + (1 - v_{f1} - v_{f_2}) \cdot \sigma_m \quad \text{IV. 15}$$

Si on pose  $v'_{f2}=0$  on obtient la formule IV.14

### c)- Cas de trois fibres

Si l'on considère la fibre  $f_3$  entourée d'une matrice 'm' (matériau homogénéisé constitué de la matrice et des fibres  $f_1$  et  $f_2$ ). Notre approche, nous permet d'écrire que La contrainte est

$$\sigma_{c3} = \xi_{f3} \sigma_{f3} v_{f3} + (1 - v_{f3}) \sigma_m''$$

avec

$$\sigma_m'' = \xi_{f1} \sigma_{f1} v_{f1}'' + \xi_{f2} \sigma_{f2} v_{f2}'' + (1 - v_{f1}'' - v_{f2}'') \sigma_m$$

$$v_{f1}'' = \frac{v_{f1}}{v_{f1} + v_{f2} + v_m}$$

$$v_{f2}'' = \frac{v_{f2}}{v_{f1} + v_{f2} + v_m}$$

Après développement on obtient :

$$\sigma_{c2} = \xi_{f1} \sigma_{f1} v_{f1} + \xi_{f2} \sigma_{f2} v_{f2} + \xi_{f3} \sigma_{f3} v_{f3} + (1 - v_{f1} - v_{f2} - v_{f3}) \cdot \sigma_m \quad \text{IV.16}$$

Si on pose  $v_3=0$  on obtient la formule IV.15

Et si n pose  $v_2= v_3=0$  on obtient la formule IV.14

### d)- Généralisation pour n fibres

En considérant n fibres de renforts dans la matrice m, on peut généraliser l'équation de la contrainte du matériau composite  $\sigma_c$  de la manière suivante:

$$\sigma_{cn} = \sum_{i=1}^n \xi_{fi} \sigma_{fi} v_{fi} + (1 - \sum_{i=1}^n v_{fi}) \sigma_m \quad \text{IV.17}$$

Donc, à partir de cette équation, nous pouvons aisément estimer la variation des caractéristiques mécaniques telles que les résistances en fonction du pourcentage des renforts dans la matrice béton, notons que les paramètres de l'équation dépendent du taux de travail de chaque constituant, où chaque renfort est pris dans un rapport d'interdépendance et de compatibilité, dont la teneur de l'ensemble est égale à 1-m.

### IV.3.1.1. 2. Application numérique

Pour pouvoir confronter les résultats de la modélisation avec ceux obtenus expérimentalement, nous considérons une matrice cimentaire pour béton et des renforts Type : fibres de verre et fibres métalliques, dont les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le tableau IV.1.

Les résultats du calcul sont obtenus par application de la formule IV.17 et sont donnés dans la tableau IV.2 et présentés dans les figures IV .6.a et IV.6.b.

**Tableau IV.1 .** Caractéristiques mécaniques des fibres de renfort et de la matrice béton

Type de fibres et matrice	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction, (Mpa).	Résistance en compression (Mpa)
Matrice béton	2,5	4,335	10,4
Fibres de verres	2.6	245	750
Fibres métalliques	7.8	197,5	200

Tableau IV.2 .Résultats du calcul

Type de béton composite	Résistance à la Traction par flexion (Mpa).		Résistance en compression (Mpa)	
	Theor	expér	théor	expér
BT	4,335	4,335	10,4	10,4
BCI	4,54	4,097	10,82	9,85
BCII	4,64	4,157	11,03	10,18

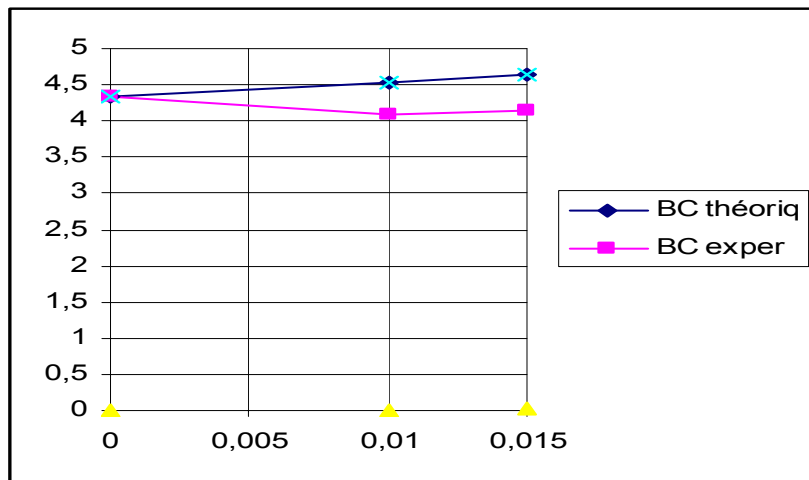


Figure IV. 6. a. Confrontation des résultats de flexion

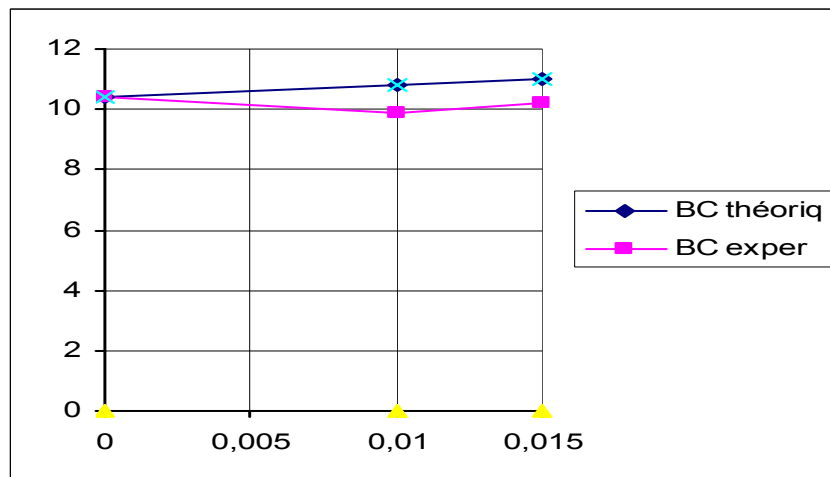


Figure IV. 6. b. Confrontation des résultats de compression

#### **IV.4.Conclusion du chapitre**

Un béton composite est constitué d'une matrice cimentaire renforcée par des fibres de renfort de nature différentes ayant une certaine compatibilité de travail mécanique, basée sur l'influence du taux de travail respectivement de la matrice et des renforts.

La confrontation des résultats est effectuée en considérant la relation obtenue par approche de la loi de mélange adaptée au cas des bétons composites en considérant le coefficient d'équivalence, a donné une bonne concordance

Nous suggérons donc de reprendre par la suite ce modèle en l'affinant par prise en considération de la notion d'orientation des fibres dans le volume élémentaire considéré et la contrainte d'adhérence.

## **CONCLUSION GENERALE**

Cette étude, qui se veut une recherche dans le domaine des nouveaux bétons, contribue sans aucun doute à l'élaboration et à la connaissance du comportement mécanique des bétons composites dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques tributaires de la destination mécanique.

Les bétons sont connus pour leur fragilité en traction. L'introduction de fibres discontinues, aléatoirement réparties dans une matrice de béton elle-même de nature hétérogène et inélastique conduit à l'amélioration de nombreuses propriétés, c'est pourquoi depuis une trentaine d'années, beaucoup de chercheurs ont investi temps et énergie dans l'analyse, la compréhension de ce matériau.

L'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire joue le même rôle que celui des armatures, c'est-à-dire reprendre les efforts de traction.

Les fibres limitent la formation et la propagation des fissures au sein de l'élément béton. Les fibres cousent à la fois les fissures existantes en empêchant leur développement et limitent la formation d'autres fissures en renforçant la matrice cimentaire.

Il ressort de la synthèse bibliographique que le comportement des fibres est un mélange complexe d'encrage mécanique et d'adhérence. Le choix des fibres à utiliser et le pourcentage à incorporer doit se faire en relation avec le comportement mécanique que l'on désire améliorer ainsi qu'avec l'application industrielle visée.

Les fibres ne modifient pas de façon significative les propriétés mécaniques correspondant au maximum de chargement, par contre, il confèrent une apparente ductilité, ceci est essentiellement dû aux phénomènes de couture induits par les fibres.

En appliquant la méthode de BARON LESAGE pour la composition de béton de fibres on a abouti à la composition de béton composite est totalement différente de celle

d'un béton ordinaire, ce qui traduit le fait qu'un composite fibré ne s'obtient pas en introduisant simplement des fibres dans une matrice donnée.

Du point de vue maniabilité et compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire aux gros graviers. La méthode utilisée conduit à des bétons riches en pâte de ciment, ce qui est très bénéfique vis-à-vis de l'adhérence entre les fibres et la matrice.

Les méthodes de mesure de l'ouvrabilité du béton ne sont pas toujours adaptées au béton de fibres, ainsi le cône d'Abrams qui peut convenir pour les faibles dosages en fibres ( $30\text{kg/m}^3$  de béton) et des maniabilités élevées ne semble pas s'adapter aux bétons fermes et aux dosages plus élevés en fibres. Les mesures faisant appel à la vibration (maniabilimètre LCL, flew test) sont plus indiquées.

Une étude expérimentale est menée sur des éprouvettes en béton seul et en béton composite. Nous nous sommes intéressés dans notre travail aux fibres d'acier et fibres de verre. On a réalisé trois variantes : béton témoin (sans fibres), béton composite BCI et BCII dans lequel on a fait varier respectivement le pourcentage en volume de 1 et 1,5%. Pour chaque variante, on a réalisé trois (3) moules prismatiques pour l'essai de traction par flexion et trois (3) moules cylindriques pour l'essai de compression.

Le comportement de ce matériau est caractérisé par des essais de compression centrée et de flexion quatre points. Les résultats obtenus sont très encourageants. Lors des essais, nous avons observé une nette amélioration du mode de rupture, une certaine ductilité est conférée aux bétons composites, la rupture fragile est remplacée par une rupture ductile.

Enfin, la confrontation des résultats obtenus par application du modèle de calcul de la contrainte développée dans les bétons composites, basée sur la relation de la loi de mélange adaptée aux cas des bétons composites, donne une bonne concordance. Les résultats sont satisfaisants.

Au terme de ce travail, nous suggérons :

-d'effectuer une étude de calibrage des paramètres de conception et de dimensionnement des bétons composites hybrides, ceci permettra sans aucun doute de mieux homogénéiser et optimiser la structure composite souhaitée.

- effectuer une étude complémentaire basée sur l'application d'autres modèles, une précision de la convergence des résultats, ceci permettra d'appréhender le phénomène de la rupture des bétons composites hybrides.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] OUCIEF,H., ARABI.N. , ‘Composition, rhéologie, mise en œuvre des bétons de fibres métalliques’ Laboratoire Matériaux Université Badji Mokhtar –ANNABA
- [2] ATASSI F. "Etude du comportement des bétons de fibres métalliques, influence de la géométrie des fibres, du dosage et de l'anisotropie de leur répartition" thèse de doctorat. INSA de Lyon, ENTPE novembre 1997
- [3] ROMULADI .J.P. ,JA MANDEL –J. Am. Concr.Inst 61(6), 657-1974.
- [4] SWAMY R.N., MANGAT. P.S., ‘Influence of fiber geometric on the properties of steel fiber reinforced concrete’ USA. Cement concrete . Res. –vol.4-N°3- PP451 May 1974.
- [5]. BEAUDOIN. J.J., ‘ Béton renforcé de fibres’ . CBD-223-F , 1982
- [6] CASANOVA,P, ROSSI. P., .LEMAOU., .F, « Calcul en flexion et caractérisation des bétons de fibres métalliques » Annales de l’ITBTP N° 528,1994.
- [7] ROSSI.P, HARROUCHE.N , LEMAOU.F, ‘comportement mécanique des bétons de fibres métalliques utilisées dans les structures en béton armé et précontraint’ Annales de l’ITBTP N°479 ,1989.
- [8] CHANVILLARD.G , ‘Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d’acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire’, étude et recherches des laboratoires des poutres et des chaussées, série ouvrage d’art OA12 ,1993.
- [9] SCHNEIDER.D, CASANOVA.P,ROSSI.P. , ‘Application du calcul à la rupture à une dalle carrée en béton de fibres métalliques sollicitée en flexion’, Annales de l’ ITBTP n°529,1994.
- [10] EDGINGTON. J., HANNANT. D.J, WILLIAM. R.T.T. , ‘Steel fiber reinforced concrete’ GB building Res. Est, Current paper CP 69174 –17p July 1974.
- [11] ROSSI.P., ‘ les bétons de fibres métalliques’, Presses de l’écoles nationale des ponts et de chaussées 1998.
- [12] SNYDER. J., LANKARD. D.R., ‘ Factor affecting flexural strength of steel fibrous concrete’, ACI journal ,vol.69 ,n°2,1972,p.96-100.
- [13] HUGUES.B .P, FATTUHI.N.I., ‘ The workability of steel fibre-reinforced concrete’, Magasine of concrete Research,vol .28,1976,p. 157-161.
- [14] ROSSI .P , ‘Formulation et comportement mécanique des bétons de fibre métallique’, Annales de L’ITBTP N° 492 , 1991 .

- [15] BALAGURU P. et RAMAKRISHNAN V., 'Properties of fiber reinforced concrete : workability behavior under long-term loading , and air-void characteristics' ,ACI Materials Journal , PP189-196 , May-June 1988 .
- [16] SERNAROS P. , 'Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement', Thèse de doctorat d'ingénieur E. N. P. C Paris, septembre 1984 .
- [17] BARON J, LESAGE R. , 'Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques', Rapport de recherche N 3 , L.C.P.C , août 1969 .
- [18] LABOTEST.P., ' Appareils d'essais' AFNOR P18-452
- [19] DREUX G., ' Nouveau guide du béton' , Edition Eyrolles , PARIS 1979 .
- [20] HAMELIN . P, DEBICKI . G. , ' Béton de fibres' , Edition de l'institut national des sciences appliquées de Lyon ; PP 01 – 41 ; 1987 .
- [21] OUCIEF H., 'Formulation et comportement mécanique d'un béton à base de fibres métalliques', Thèse de magister en génie civil option matériaux ; Université de Annaba ; 16Mars1992.
- [22] REHAILIA H., 'Application de la mécanique linéaire élastique de la rupture aux béton à fibres', Thèse de magister en génie civil option matériaux ; Université de Annaba ; 30 Juin1992 .
- [23] SWAMY R. N .et MANGAT P . S. « Influence of fiber geometrie on the properties of steel fiber reinforced concrete » ; U . S.A cement –concrete ; Volume 4 N° 3 ; pp 451-465 ; May 1974 .
- [24] EDGINGTON J . , HANNAUT D . J . , WILLIAM R . T . T . , « steel fiber reinforced concrete » ; G . B. bulding . Res –curent paper 17 ; July ; 1974 .
- [25] NASLAIN, R. Introduction aux matériaux composites .2-Matrices métalliques et céramiques, Ecole d'été du CNRS, Bombanes ,Sept. 1979 ,20 p .
- [26] HOUGET ,AMBROISE ,J. PERA,J . Propriété mécaniques des composites ciment fibres organiques, Material and structures, 1989 , Vol.28,No178 ,p . 220-229 .
- [27] JEJCIC ,D .etZANGELINI , F. Mortiers et ciments armés de fibres , Une étude bibliographique , Annales de l'institut Technique du Bâtiment et des travaux publics ,Fev .1977,No 347,72 P .
- [28] NISHIOKA.K, YAMAKAWA .S, SHIRAKAWA .K. , 'Properties and applications of carbon fibre reinforced cement composites' , RILEM Symposium, Sheffield,July 13-17 1986 , 10 p.

- [29] ACCION . F , GORBANTES. J, BLANCO . M. T. , ‘Cement reinforced by acrylie fibres , Infarced studies , I / Hydratation and hydrolysis process in the fibres’ , Cement and concrete Research , 1990 p . 107-114 .
- [30] AMBROISE .J ,MURAT . M ., PERA , J ., ‘ Durabilité des fibres de verre dans les différents milieux cimentaires en cours de consolidation , Etude d’une fibre de verre E , Verre et Réfractaire’ , Nov et Déc . 1985 , Vol 6 ,p . 905-910.
- [31] JELEDI. A., ‘Conception d’un matériau composite à matrice cimentaire renforcée par des fibres de polyester’, Thèse Sci . Institut National des sciences Appliquées de Lyon , Univ Lyon1 ,1991,171 P.
- [32] BERTHELOT, J-M ; « Matériaux composites- comportement mécanique et analyse des structures », Edition Tech- doc, Paris ,1999- 642p..
- [33] CUYKENS.T, VANSTERMANS.J., ‘Béton de fibres en aciers’, Extrait de C.S.T.C. Revue n°3, septembre1977.
- [34] Zhan.Z ., ‘Contribution au dimensionnement des pieux en béton de fibres’, Thèse de doctorat, 1991. Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, France
- [35] GAY. D. « matériaux composites », édition Hermès, Paris 1989, pp 672.
- [36] BALEY C. .,LAMY. B.,QUEMENER J.J « Les fibres de lin comme renfort de matériaux composites», 14<sup>ème</sup> congrès Français de Mécanique, 6 pages sur le CD de acte référence ISBN 2-84088-040-7 Dépôt légal : Juillet 1999. ENSAE DTE 07-1999.
- [37] M.GEIR., « Manuel qualité des composites, technique de documentation » Lavoisier, France, 1989
- [38] FATMI. L., BERTHELOT J.M. , « Modélisation de l’endommagement des matériaux hétérogènes : application au béton cas de la flexion 3 points statique »Revue Française de mécanique, 2001, N°.2, pp 89-97.
- [39].HAIPIN J.C « Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites », Journal of composites materials,1969, Vol. 3, pp 732-734.
- [40]T.VU-KHANH,V.DO THANH, « Predicting shrinkage in polyester reinforced by glass fabrics», Journal of composites materials,2000, Vol 34, pp 998-1008.
- [41]ASHBEE K : Fundamental principles of fiber reinforced composites. *Second edition* , Technomic Publishing Company, Inc, Lancaster, PA, p424, (1993)
- [42]BATOZ J.L ET DHATT, G : Modélisation des structures par éléments finis. Edition Sainte-Foy : *Presses de l’Université Laval* , Québec, Canada, (1990)

- [43]BIGG D.M : Effect of compounding on the properties of short fiber reinforced injection moldable thermoplastic composites. *Polym. Compos.* , 6(1), 20-28, (1985)
- [44]COX H.L : The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *Brit. J. App. Phys.* , 3, 72-79, (1952)
- [45]J. LEMAITRE ET J.-L. CHABOCHE, « Mécanique des matériaux solides », Ed. Dunod
- [46] LEIF. A, Carlsson , R.,Byron. P., « Experimental characterization of advanced composite materials », Technomic Publishing Co. Inc.
- [47] BERREUR L. ; MAILLARD. B, NOSPERGER.S., ' Etude prospective et stratégique sur les matériaux composites', Industrie Française des matériaux composites, pp 3-129, Décembre 17/2001
- [48] FRAÇOIS. D., 'Essais mécaniques et lois de comportement', Edition Hermès, pp647-684, Paris 1997
- [49] GERMAIN.P., ' Mécanique de la rupture fragile', pp 214, Paris 4<sup>ème</sup> trimestre, 1997
- [50] RECHO.N, ' Rupture par fissuration des structures', Edition Hermès, pp 362, Paris 1995
- [51] REYNE.M , 'Technologie des composites', 2<sup>ème</sup> Edition Hermès, pp 190, Paris 1995
- [52]CHATAIN.M,' Matériaux composites, présentation générale', Techniques de l'ingénieur, AM.5.000., 2003
- [53] CHRETIEN.G,' Matériaux composites à matrice organique',pp 129, revue Lavoisier, 1986
- [54] PILLOT.C,' Les principaux matériaux composites : applications techniques de mise en oeuvre', volume 7, pp 68, Paris 1985
- [55] BOURGEOIS.N,' Caractérisation et modélisation micromécanique du comportement et de l'endommagement d'un composite à matrice métallique', Thèse de Doctorat, Ecole centrale Paris, soutenu le 18 janvier 1993
- [56]GONG.X.L,' Méthodologies expérimentales : caractérisation et comportement mécanique des matériaux',pp 168, 1993