

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITÉ DE BOUMERDES
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE DES MATERIAUX**



**RESUME DU
MÉMOIRE DE MAGISTER**

EN GÉNIE DES MATÉRIAUX

Option: Physique et mécanique des matériaux

Présenté par : M. BALAL AHMED

THEME

*Influence du Ferrailage Combiné sur L'amélioration
des Performances Mécaniques d'un Élément Fléchi*

Devant le jury d'examen :

Mr. BEZZAZI. B	Professeur	UMBB	Président
Mr. AIT TAHAR. K	Maître de conférences	UMMTO	Rapporteur
Mr. BOUAFIA. Y	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr. ZERIZER .A	Maître de conférences	UMBB	Examineur
Mr. MEDDAHI. A	Chargé de recherche	UMBB	Examineur

LMMC – Boumerdès 2005

SOMMAIRE

CHAPITRE. I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE :

LE BETON DE FIBRES ET SES APPLICATIONS

Introduction.....	5
I.1.1- Historique	5
I.1. Béton renforcé de fibres	7
I.1.1. Rôle des fibres	7
I.1.2. Fabrication	8
I.1.3. Diverses applications	8
I.1.4. Propriétés du matériau composite	9
I.1.3- Rôle des fibres dans le béton	11
I.1.4 – Différents types de fibres	12
I.1.4.1- Fibres non organiques	12
I.1.4.2- Fibres organiques	14
I.1.5.- Mise en œuvre du béton de fibres	14
I.1.6- Formulation du béton de fibres	14
I.1.6.1- Optimisation des bétons de fibres métalliques par la méthode B. Lesage	15
I.1.7- Notion d'ouvrabilité (maniabilité)	16
I.1.7.1- Dosage en fibres	17
I.1.7.2- Longueur et section de la fibre	18
I.1.7.3- Influence des granulats	18
I.1.7.4- Influence de la géométrie de la fibre	19
I.1.8- Les applications pratiques des bétons de fibres	19
I.1.8.1- Les dalles	20
I.1.8.2- Les revêtements	20
I.1.8.3- Béton projeté	20

1.1.8.4-Fondation de machines	21
I.1.8.5-Fondations profondes	21
I.1.8.6-Constuctionhydraulique	21
I.1.8.7-Remplacement ou addition des fibres aux armatures transversales	21
I.2-Comprtement mécanique des bétons de fibres	22
I.2.1-Effet des fibres dans une matrice	22
I.1.2.1-Precessusde fissuration dans le béton	22
I.2.1.2-Effet de l'orientation et de l'espacement des fibres	23
I.2.1.3-Influence de l'adherence fibre - matrice	25
1.2.1.4-Influencede la geometne de la fibre	25
Conclusion du chapitre	27

CHAPITRE III : APPROCHE DU COMPORTEMENT MECANIQUE ET MODELISATION STATIQUE DES POUTRES SOUMISES EN FLEXION

Introduction	28
II. 1. Rappel des différentes lois de comportement	29
II. 1.1. Comportement du béton en compression	29
II.1.2. Comportement des aciers naturels (passifs) dans la zone compnmee	30
II.1.3. Comportement des aciers écrouis (passifs) dans la zone comprimée	31
II.1.4. Comportement des aciers actifs	3:
II.1.5. Diagramme fictif des aciers (naturels écrouis) en traction.	32
II.2. Béton arme de fibres d'acier	34
II.3. Relation d'équilibre et état de contraintes	35
II.3.1. Cas d'une section armée traditionnellement.	35
II.3.2. Cas d'une section armée de fibres métalliques.	
II.3.3. Cas d'une combinaison de ferrailage : A_{min} plus % des fibres métalliques.	37
11.4.Exemple d'application.	39
Conclusion du chapitre.....	42

CHAPITRE III . IDENTIFICATION PHYSICO-CHIMIQUE DES CONSTITUANTS

III.1-Généralités	43
III.2- Matériaux utilisés	43
III.2.1-Analyse des matériaux	43
III.2.2. Résultats des essais granulométriques et physiques:	44
III.2.2.1. Analyse granulométrique du sable : NF P18.560	44
III.2.2.2. Analyse granulométrique du gravier 8/15: NF P18.560	45
III.2.2.3. Analyse granulométrique du GRAVIER 15/25: NF P18.560	46
III.2.2.4. Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau :	47
III.2.3. Résultats des essais physiques sur le ciment Rais Hamidou:	48
III.3. Composition béton	51
III.3.1. Formulation selon DREUX :	51
III.3.2. Provenance des fibres utilisées	53
III.3.3. Fabrication et mise en Oeuvre	53
III.3.3.1. Problématique	53
III.3.3.2. Procédure de malaxage	54
III.3.3.1.1. Caractéristique propre du malaxeur	54
III.3.3.1.2. Sequence de malaxage	55
III.3.3.1.3. Procédure de préparation des éprouvettes et de mise en œuvre	55
III.4. Différentes mesures	57
III.4.1. Mesure de l'ouvrabilité	57
III.4.2. Comportements différents	58
III.4.2.1. Quantification du retrait sur mortier	58
III.4.3. Evolution de la résistance sur mortier	58
Conclusion du chapitre	61

CHAPITRE IV. ESSAIS MECANIQUES ET ANALYSE DES RESULTATS

IV.1. Introduction	62
IV.2. Essais mécaniques	62
IV.2.1, Essai de resistance a la traction par flexion [NF P18-407].....	62
IV.2.2. Essai de resistance a la compression [NF P18-406].....	62
IV. 2.3. Compositions granulaires	63
IV.3. Essais de compression.	64
IV.3.1. Mode operatoire.	64
N.3.2. Résultats des essais de compression	65
IV.4. Essai de traction par flexion	69
IV.5.1. Analyse des résultats	82
Conclusion du chapitre	84

CONCLUSION GENERALE	85
----------------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Résumé L'essor technologique et industriel des matériaux de construction réside dans une bonne synergie avec le secteur de la recherche pour équilibrer les efforts de flexion, une section d'armature est indispensable. Les règles et normes actuelles, permettent de déterminer la section (A) d'armatures nécessaire pour un effort sollicitant donné.

Dans un but d'économie de matériaux, gain d'énergie et d'optimisation du travail de la section sous chargement statique et dynamique, nous proposons une approche qui consiste à remplacer la section de calcul « A » par une combinaison de la section « $A_{\min}$ » et un pourcentage de fibres métalliques. La somme de ces deux dernières sections est au plus équivalente à la section totale « A ».

Cette approche permettra sans aucun doute de rendre la matrice plus ductile, plus résistante, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie.

Dans notre présent travail de recherche, le problème consistera donc à définir les lois régissant le comportement mécanique de telles structures à ferrailage combiné sous différents cas de chargements et conditions d'exploitation à valider la modélisation par une étude expérimentale.

Ceci permettra de mettre en évidence l'intérêt de cette approche de ferrailage combiné, en vue d'améliorer les propriétés physico mécaniques, telles que la ductilité et les résistances, en particulier sous chargement instantané, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie.

Mots clés : caractérisation, modélisation, fibres, ferrailage combiné, essais.

abstrat : The technological and industrial rise of building materials lies in a good synergy with the research sector to balance the bending stresses, a section of reinforcement is necessary to be introduced in cement concrete. The rules and current standards make it possible to determine the section (A) of reinforcements necessary for a given soliciting load.

With an aim of saving in materials, profit of energy and optimization of the work of the section under static and dynamic loading, we propose an approach which consists in replacing the section of calculation " A " by a combination of the section " A_{min} " and a percentage of metal fibers . These two last sections will be most equivalent to total section " A ".

This approach will make it possible without any doubt to make the matrix more ductile, more resistant, while ensuring an economy out of materials and energy.

In our present research task, the problem will thus consist in defining the laws governing the mechanical behavior such structures in reinforcement combined under various cases of loadings and conditions of operating to validate modeling by an experimental study.

This will make it possible to highlight the interest of this approach of combined reinforcement, in order to improve the physics and mechanics properties, as the ductility and stresses, en particulier under loading instantly, all by ensuring surely an economy out of materials and energy.

Key words: characterization, modeling, fibers, combined reinforcement, tests.

L I S T E D E S F I G U R E S

<i>Désignation</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Figure.I.1	La fonction des fibres dans une matrice [2]	12
Figure.I.2	Détermination du rapport S/G optimal [2,27]	16

Figure I.3	Effet des fibres incorporées dans le béton	17
Figure.I.4	Encadrement d'un granulat :	18
Figure I.5	Effet d'une fibre dans la matrice. [2]	22
Figure II.1	Comportement du béton en compression selon SARGIN [26]	29
Figure II.2	Comportement des aciers naturels	30
Figure II.3	Comportement des aciers écrouis [26]	31
Figure II.4	Loi σ - ϵ d'un acier de précontrainte	31
Figure II.5	Diagramme fictif σ - ϵ de l'acier naturel en traction	32
Figure II.6	Diagramme fictif σ - ϵ de l'acier écrouis en traction	33
Figure II.7	Comportement du béton de fibres d'acier en traction [8, 26]	34
Figure II.8	Lois de comportement réel et simplifié [8]	36
Figure II.9	Etats d'équilibres des sections.	37
Figure II.10	Variation de la position de l'axe neutre en fonction du pourcentage de fibres	39
Figure II.11	Variation du volume des fibres en fonction du pourcentage de fibres	40
Figure II.12	Variation du moment de rupture 'Mu' en fonction du pourcentage de fibres	40
Figure II.13	Variation du moment de fissuration 'Mser' en fonction du %de Fibres.	41
Figure III.1	Analyse granulométrique des granulats. Selon NF P18.560	46
Figure III.2	Evolution de la résistance à la flexion du ciment	49
Figure III.3	Evolution de la résistance à la compression du ciment	49
Figure III.4	Les constituants minéralogiques de clinker	51
Figure III.5	Variation du poids des fibres en fonction de leur pourcentage	52
Figure III.6	Type de fibres métalliques utilisées	53
Figure III.7	Malaxeur à axe vertical : Malaxage du béton témoin	54
Figure III.8	Introduction de fibres au cours de malaxage	55
Figure III.9	Etapes de préparation des éprouvettes	56
Figure III.10	Affaissement en fonction du type de béton	58
Figure III.11	Affaissement du béton	59
Figure III.12	Variation du retrait à 7 j et 28 j	60
Figure III.13	Variation de la résistance du mortier en compression à 7 j et 28 j	61
Figure IV.1	Remplissage et vibration des moules	64
Figure IV.2	(A) - Machine de compression ; (B) - Ajustement de l'éprouvette	64
Figure IV.3	Les étapes pour le calcul de déplacement	66
Figure IV.4	Variation des résistances à la compression selon la composition	68
Figure IV.5	Les Variation du déplacement longitudinal selon la composition	68
Figure IV.6	Les Variation de la masse volumique selon la composition	68
Figure IV.7	Variation du déplacement longitudinal en fonction de σ selon la composition	69
Figure IV.8	Remplissage des moules et vibration	70
Figure IV.9	Dispositif de chargement	71
Figure IV.10	Machine d'essai de flexion 4 points	71

Figure IV.11	Exemple de ferrailage des éprouvettes	72
Figure IV.12	Allure des courbes charge- flèche	72
Figure IV.13	Répartition des macro fissures	77
Figure IV.14	Variation de la résistance à la flexion selon la composition	78
Figure IV.15	Variation de la contrainte à la flexion selon la composition	78
Figure IV.16	Variation de la masse volumique selon la composition	78
Figure IV.17	Variation de la flèche selon la composition	79
Figure IV.18	Force engendrant la 1 ^{ère} fissure selon la composition	79
Figure IV.19	Force de rupture selon la composition	79
Figure IV.20	Flèches correspondantes à la 1 ^{ère} fissure selon la composition	80
Figure IV.21	Flèches à la rupture selon la composition	80
Figure IV.22	Moment de rupture selon la composition	80
Figure IV.23	Moment de fissuration selon la composition	81
Figure IV.24	Variation de ' $\Delta M_{ser} / M_{ser}$ ' en fonction du pourcentage de fibres	81
Figure IV.25	Variation de ' $\Delta \mu / \mu$ ' en fonction du pourcentage de fibres	82

LISTE DES TABLEAUX

<i>Désignation</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Tableau I.1.	Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres [7]	7
Tableau.I.2.	Application de divers renforcements de fibres dans les produits à base de ciment* [7].	9
Tableau I.3.	Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.[7]	10
Tableau I.4.	Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés	10
Tableau I.5	Caractéristiques géométriques des fibres couramment utilisées [2].	13
Tableau II.1	Caractéristiques de la section.	35
Tableau II.2	Caractéristiques de la section (2)	36
Tableau II.3	Caractéristiques de la section à ferrailage combiné	37
Tableau II.4	Relations d'équilibre	38
Tableau III.1	Équivalent de sable	44
Tableau III.2	Analyse granulométrique	45
Tableau III.3	Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption de la teneur en eau	47
Tableau III.4	Analyse chimique de sable et du gravier	47
Tableau III.5	Analyse minéralogique de sable et du gravier	48
Tableau III.6	Essais physiques sur ciment	48
Tableau III.7	Essais mécaniques sur ciment	49
Tableau III.8	Analyse chimique de ciment	50
Tableau III.9	Analyse minéralogique de ciment	50
Tableau III.10	Composition de béton témoin	51
Tableau III.11	Poids des fibres incorporées dans une éprouvette prismatique « 14x14x56 »	52
Tableau III.12	Caractéristiques des fibres	53
Tableau III.13	Indexation des éprouvettes	56
Tableau III.14	Affaissement au cône d'Abrams	57
Tableau III.15	Retrait du mortier sans et avec fibres	59
Tableau III.16	Variation des résistances du mortier avec fibres et sans fibres	60
Tableau IV.1	Composition de béton ferrailé avec des barres de T6.	63
Tableau IV.2	Composition de béton ferrailé avec des barres de T12	63
Tableau IV.3	Résultats des essais de compression béton témoin	65
Tableau IV.4	Résultats des essais de compression béton témoin avec 60%de fibres	65
Tableau.IV.5	Résultats des essais de compression béton témoin avec 100% de fibres	65
Tableau IV.6	Résultats effort - déplacement longitudinal du différent type de béton	67
Tableau IV.7	Eléments de comparaison pour les différents types de béton	67
Tableau IV.8	Essai de flexion à 04 points sur béton témoin	73
Tableau IV.9	Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T12	73
Tableau IV.10	Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6	74
Tableau IV.11	Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 30% de fibres	74
Tableau IV.12	Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 60% de fibres	74
Tableau IV.13	Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 100% de fibres	75

Tableau IV.14	Résultats effort- flèche du différent type de béton force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton	76
---------------	---	----

Introduction Générale

Introduction Générale

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.

Par ses nombreuses qualités, le béton peut être utilisé dans des conceptions nouvelles et multiples, vu qu'il peut être moulé dans les formes les plus diverses, et présente une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, il est peu combustible et peu toxique.

Les deux principales caractéristiques qu'ont néanmoins limité son utilisation sont : fragilité et mauvaise résistance à la traction. Cependant, la récente mise au point de produits composites renforcés de fibres dans les secteurs de l'aérospatiale et des plastiques a offert la possibilité de palier ces lacunes.

L'essor technologique et industriel des matériaux de construction réside dans une bonne synergie avec le secteur de la recherche. Pour équilibrer les efforts de flexion, une section d'armature est indispensable. Les règles et normes actuelles, permettent de déterminer la section (A) d'armature nécessaire pour un effort sollicitant donné.

Un état limite correspond à un état particulier dans lequel la condition requise d'exploitation et de résistance est strictement satisfaite. La variabilité de la résistance et des autres propriétés physico mécaniques de la matrice cimentaire est tributaire des propriétés intrinsèques de ces constituants à savoir, pour un élément de poutre travaillant en flexion, celles du béton et de l'acier.

Afin d'améliorer le comportement mécanique de l'élément et de palier à l'inconvénient fort malheureusement connu du béton armé et pour conférer une meilleure ductilité, une substitution totale des aciers traditionnels par des fibres (BAF) a été largement traitée dans les travaux antérieurs et amplement publiée dans la littérature spécialisée existante actuellement.

Pour une section en béton seul, la rupture est fragile. Elle se produit dès que la déformation maximale atteint « ϵ_t » (déformation correspondante à la résistance à la traction du béton). Pour une section en BAF (béton armé de fibres), il y a fissuration puis plastification progressive avec déplacement de l'axe neutre. Il en résulte une augmentation du bras de levier des efforts internes.

Ce digest décrit les propriétés générales et l'utilisation en construction du béton renforcé de fibres. La promesse d'ajout des fibres métalliques dans la matrice béton, seulement dans la zone tendue de l'élément fléchi, dont la quantité est déduite de la section d'acier réelle diminuée de la section minimale exigée par le règlement de calcul, permettra sans aucun doute de le rigidifier, de le rendre plus résistant et moins sujet à la fissuration. L'addition d'une petite quantité de fibres rend cette innovation donc très intéressante.

Ayant constaté souvent dans les notes de calcul des éléments soumis en flexion simple, une très grande différence de la section calculée par rapport à celle exigée par les règlements en vigueur, nous nous sommes donc intéressés à proposer, une approche qui consiste à remplacer la section de calcul "A" par une combinaison de la section minimale " $A_{\min}$ " exigée par les règlements de calcul et normes avec un pourcentage de fibres métalliques, dans un rapport de proportionnalité. La somme de ces deux dernières sections est au plus équivalente à la section totale "A".

Cette conception est réalisée Dans un but d'économie de matériaux, gain d'énergie et d'optimisation du travail de la section sous chargement statique et dynamique.

Dans notre présent travail de recherche, le problème consistera donc, à définir les lois régissant le comportement mécanique de telles structures à ferrailage combiné sous différents cas de chargements et conditions d'exploitation, à valider la modélisation par une étude expérimentale.

Ceci permettra de mettre en évidence l'intérêt de cette approche de ferrailage combiné, en vue d'améliorer les propriétés physico mécaniques, telles que la ductilité et les résistances, en particulier sous chargement instantané, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie

Cette étude se veut donc une innovation dans le domaine si vaste du béton. L'étude conceptuelle et la caractérisation expérimentale mécanique ont permis de mettre en valeur cette conception.

Le présent travail est structuré comme suit :

Chapitre I : Etude bibliographique : Le béton de fibres et ses applications.

Dans ce chapitre a été rappelé tout l'historique du béton de fibres ; en particulier les caractéristiques des différentes fibres, le BAF et ces applications diverses dans la construction, les travaux antérieurs des différents chercheurs. Cette partie est terminée par une synthèse où l'intérêt de notre étude est clairement posé et identifié.

Chapitre II. Approche du comportement mécanique et modélisation statique des poutres soumises en flexion .

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à approcher le mode de fissuration et rupture des poutres en béton armé traditionnel et des poutres renforcées par des fibres métalliques issues de la récupération des freins des vélos et motocycles, en se basant sur les équations d'équilibre de la section. L'influence des fibres est clairement mise en évidence par leur contribution à reprendre les efforts de fissuration et de rupture. L'influence du taux ou pourcentage de fibres à incorporer est prise en charge par la variation de 30 % ; 60% et 100% respectivement dans la matrice cimentaire. La somme de la combinaison de la section minimale " A_{min} " et de la section de fibres métalliques est au plus équivalente à la section totale " A ".

Chapitre III. Identification physico-chimique des constituants

L'identification physico – chimique des constituants a permis de déterminer les propriétés intrinsèques à savoir : la distribution granulaire, l'équivalent du sable, le retrait ; la nature des fibres, les résistances du mortier selon la composition, etc.

Le choix des fibres utilisées est très intéressant, car il a un impact direct sur l'environnement et permet une valorisation des produits de récupération, particulièrement les différentes fibres issues des câbles de freins, qui constitue un élément d'importance croissante dans l'exécution des projets de construction.

L'influence de ces types de fibres issues de la récupération des câbles de freins des vélos et motocycles, dans l'amélioration des performances est largement mis en exergue. Ce qui est de bonne augure quant au comportement mécanique des éléments fléchis.

Chapitre IV. Essais mécaniques et analyse des résultats

Dans ce chapitre, pour mieux caractériser le comportement mécanique des bétons renforcés par des fibres métalliques issues de la récupération ; des essais mécaniques ont été effectués et réalisés dans différents endroits (laboratoires). Quatre types d'éprouvettes ont été conçues à savoir : poutres en béton non armé ; poutres en béton armé de T6 ; poutres armées de T12 et poutres combinées T6 plus fibres. La substitution en section équivalente, en fraction de 30%, 60% et 100% a été adoptée pour mettre en évidence l'influence des fibres de cette nature dans l'augmentation des rigidités et des résistances.

Une analyse détaillée des différents résultats obtenus est également donnée, où l'intérêt mécanique et économique de cette recherche est mis clairement en évidence

Enfin une conclusion générale termine cette étude.

Chapitre I
Recherche Bibliographique:
Le béton de fibres et ses Applications

CHAPITRE I. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE :

LE BETON DE FIBRES ET SES APPLICATIONS

INTRODUCTION.

L'essor technologique et industriel des matériaux de construction réside dans une bonne synergie avec le secteur de la recherche. Pour équilibrer les efforts de flexion, une section d'armature est indispensable. Les règles et normes actuelles, permettent de déterminer la section « A » d'armatures nécessaire pour un effort donné [31].

Dans un but de conférer à la section une meilleure résistance à la fissuration et à la rupture, on effectue un ajout de fibres métalliques en proportions limitées. Le problème du béton armé de fibres étant largement traité dans la littérature actuelle. Les fibres métalliques incorporées dans une matrice cimentaire améliorent le comportement ductile du béton [3, 8, 17, 23 et 25].

On appelle béton de fibres, un béton dans lequel, on a prévu une armature incorporée par inclusion directe de fibres isolées au moment de gâchage ou de la projection. Les fibres y sont donc assimilables à un granulats spécial de forme très allongée et de forte résistance à la traction, susceptible d'améliorer légèrement la résistance de la matrice et surtout de créer au travers des fissures des coutures améliorant le comportement de post fissuration de la matrice. Ainsi le matériau devient plus ductile.

Ces éléments résistants sont noyés dans le béton de manière plus ou moins aléatoire tant au niveau de l'orientation que de la position.

I.1.1- HISTORIQUE

Dès 1847, conscient du phénomène de fissuration du béton, J.Lambot proposa de renforcer ce matériau par l'addition des fils continus ou du treillis métalliques. Ces développements sont à l'origine de la technologie actuelle du béton armé. Ce concept conduit toutefois à un matériau anisotrope dans lequel les armatures continues, nécessitent, à la construction, un travail manuel important et ne travaillent que dans une

direction privilégiée (sont relativement inefficaces aux fissures microstructurales) . La préoccupation majeure des ingénieurs de génie civil était alors de créer un matériau à matrice cimentaire renforcée de façon homogène et ayant un comportement isotrope [31]

Le concept de l'utilisation de fibres pour améliorer le comportement des matériaux fragiles est connu depuis longtemps ; on peut citer par exemple ; les briques en terre armée de pailles , le plâtre armé de filasse , le ciment renforcé de fibres d'amiante...etc., cela ouvrait la voie au renforcement du béton par des fibres discontinues dispersées aléatoirement dans le volume .Le procédé a été appliqué, pour la première fois au béton (en tant que mélange durci de mortier et de gravier) en 1910 par H.F .Porter (aux état unis). Celui-ci signala que les propriétés physiques du béton pouvaient être considérablement améliorées en y ajoutant des clous .Le premier brevet date de 1991 (W.Ficklin aux état unis).Pour avoir un béton résistant à la fissuration et à l'usure, des copeaux métalliques sont alors proposés par ce même auteur comme ajout à la matrice de béton.

Chanvillard .G, a rapporté que la technologie du béton renforcé de fibres a connu deux périodes, la première allant du vingtième siècle (20^{ème}) jusqu'aux années 1960 qui a été caractérisée par l'incertitude et des spéculations sur les performances réelles de ce composite , la deuxième période débutait à partir des années 1960, où il s'est produit une sorte d'éveil dans ce domaine .A partir de cette période , les moyens expérimentaux permettaient d'envisager des essais pilotés en déformation .Il s'en est suivi une période d'expérimentation intense , ponctuée de période d'enthousiasme et de déception [23].

Aujourd'hui, une multitude de fibres, tant dans la géométrie que dans le matériau qui la constitue, est disponible sur le marché et continue d'être développée. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques de bétons renforcés de fibres, augmente l'utilisation de ces bétons dans les applications industrielles [2, 8, 12,17, 19, 20 et 21].

I.1. BETON RENFORCÉ DE FIBRES

I.1.1. Rôle 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'armatures en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. [3,8 et23]

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 lors de la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et gros. Parmi les fibres les plus utilisées, citons les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène (tableau 1).

Tableau 1. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres [7]

Fibre	Diamètre en μm	Densité	Allongement de rupture %	Module d'élasticité, GPa	Résistance en traction, 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 boules dans le mélange (formation d'oursins), créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité.

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

I.1.2. Fabrication

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 p. 100 du volume, contre 50 p. 100 pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres.

Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de gros granulats. Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment (E/C) élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment (E/C) moins élevé, permet d'obtenir un produit plus résistant. [23]

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 p. 100 ou plus de granulats très fins.

Les supers plastifiants incorporés dans des bétons renforcés de fibres peuvent réduire le rapport eau/ciment (E/C) et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais [10, 11, 13]

I.1.3. DIVERSES APPLICATIONS

Les nombreuses innovations de la technologie des bétons renforcés de fibres ont permis d'étendre considérablement la gamme des applications (tableau 2).

Tableau 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.1.4. PROPRIETES DU MATERIAU 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. [7]

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 3 et 4).

Tableau 3. Ténacité des matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés.[7]

Matériau composite	Volume de fibres en pourcentage (%)	Ténacité p/r aux produits non renforcés*
BÉTON		
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
MORTIER		
acier	1,3	15,0
amiante	3-10	1,0-1,5
PÂTE DE CIMENT		
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.		

Tableau 4. Résistance en flexion de matériaux à base de ciment renforcés de fibres par rapport à des matériaux non renforcés

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.		

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 [1, 2, 4, 12,21 et 30]

I.1.3- ROLE DES FIBRES DANS LE BETON

De l'ensemble des recherches effectuées, il est apparu que le rôle principal des fibres est de mieux contrôler la fissuration du béton en état de service en réduisant l'ouverture de fissures et transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargements ultimes [3, 8,23] .Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes, le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge ...etc. Dans le cas d'un béton fissuré, quand on exerce une traction sur la matrice, les lignes de tensions doivent s'infléchir parce que la charge ne peut être transmise par la fissure et les tensions aux extrémités de la fissure augmentent [23].

La résistance à la traction, relativement faible du béton est très rapidement atteinte , une fissure se crée et se propage sans empêchement (formation de la fissure magistrale) et donne lieu à une rupture fragile Dans le cas de béton de fibres, une partie de la force de traction peut être transmise à travers cette fissure par les fibres qui en assurant la « couture » Figure I.1, il va de soi que mieux les fibres sont ancrées dans le béton et plus elles sont nombreuses, plus grande sera leur efficacité.

Les fibres à la traction ont donc, comme but principal de modifier la répartition des fissures, de les coudre et par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc plus ductile (il faut plus d'énergie pour faire progresser la fissure) [2, 3 , 8 et 26].

Les caractéristiques qui en résultent directement assurent une meilleure résistance en traction et une meilleure résistance aux chocs ; parce qu'il reste une résistance résiduelle la même, après fissuration et cela contrairement à un béton non armé

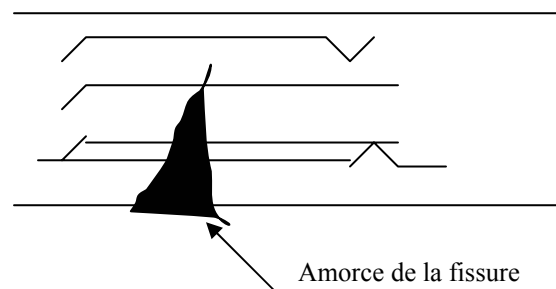


Figure I.1.La fonction des fibres dans une matrice [2]

I.1.4 – DIFFERENTS TYPES DE FIBRES

Il existe de nombreux types de fibres qu'on peut regrouper en deux catégories, selon leurs propriétés mécaniques : Les fibres organiques et les fibres non organiques.

I.1.4.1-fibres non organiques

Ce sont des fibres minérales telles que l'amiante, la céramique, le carbone, le bore de verre, les fibres métalliques ; ces fibres ont une bonne résistance à la traction et un module élastique très grand par rapport à la matrice [15,23,27 et 25].

Les fibres les plus utilisées dans les bétons et mortier hydraulique, ce sont les fibres métalliques disponibles dans une gamme étendue et sont classées en deux grandes familles, qui se distinguent par leur fonctionnement.

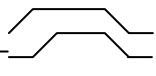
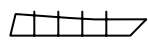
Les fibres fonctionnant par adhérence, sont de forme aplatie pour avoir une surface spécifique importante mais peu ductiles : leur intérêt étant de limiter les ouvertures de fissures.

Les fibres fonctionnant par ancrage de forme cylindrique en acier tréfiles, ont un comportement ductile. L'ancrage pouvant être amélioré par des crochets, ajoutés aux extrémités de la fibre ou des ondulations disposées tout le long de la fibre, ces fibres sont utilisées généralement lorsque l'objectif étant d'améliorer la ductilité ; c'est-à-dire de reprendre des efforts importants lorsque les fissures sont assez ouvertes.[2].

Les fibres couramment employées sont les suivantes (tableau I.1)

Tableau I-1 : Caractéristiques géométriques des fibres couramment utilisées [2].

	Forme géométrique	Matière constituante	Rt* (MPa)	E* (MPa)	Long (mm)	Larg (mm)	Diam (mm)	Epaiss (mm)
--	----------------------	-------------------------	--------------	-------------	--------------	--------------	--------------	----------------

Bekaert Dramix ZC50/50		Fil d'acier étiré à froid	1100	2.10^5	50	----	0.5	-----
Eurosteel 50/80 60/100		Acier tréfilé teneur en carbone <0.15%	1400	2.10^5	50 60	---- ----	0.8 1.0	---- ---
Pont à Mousson	Forme d'un ruban 	Fonte amorphe en chrome $\approx 5\%$	2000	$1,4.10^5$	60	1.5 à 2	-----	30.10^6
Harex		Obtenu par fraisage de bloc d'acier	700	2.10^5	32	2	-----	0.25

*Rt : résistance à la traction de la fibre

*E : module d'élasticité de la fibre

II.1.4.2- Fibres organiques

Elles se divisent en trois groupes

- les fibres animales.
- les fibres végétales.
- les fibres synthétiques.

Elles présentent des caractéristiques mécaniques plus faibles que celles du béton, mais, elles sont mieux adaptées au renforcement des sols ; notamment dans les corps de chaussées.

I.1.5.-MISE EN ŒUVRE DU BETON DE FIBRES

Une mise en œuvre des bétons de fibres facile, exige que le dosage en fibres ne peut en réalité dépasser certaines limites au delà des quelles le gâchage et la mise en œuvre deviennent impossibles.

L'ouvrabilité dépend essentiellement du dosage en volume de fibres, de la forme et de l'élongation égale au rapport l/d (longueur /diamètre). Pour avoir une mise en œuvre et une efficacité mécanique après durcissement, on se trouve contraint de se limiter à une gamme de pourcentages qui ne donnent qu'une efficacité mécanique réduite mais qui permettent une mise en œuvre acceptable [3,23].

I.1.6-FORMULATION DU BETON DE FIBRES

En ce qui concerne le problème de formulation des bétons de fibres, la littérature propose généralement des formules empiriques tirées des données acquises au cours de nombreuses études expérimentales. Elles conduisent dans certains cas à des recommandations ironiques. Ainsi pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques (BAFM), le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) propose une méthode expérimentale basée sur la méthode Baron Lesage, utilisée pour les bétons courants. [6,10,13 et 27].

Suivant l'application industrielle envisagée, la composition du béton de fibres métalliques doit être à chaque fois spécifique et doit conduire à un composite optimisé vis à vis de cet objectif visé, ainsi suivant que l'on désire obtenir un béton de fibres métalliques très maniable, très résistant ou encore ayant une influence sur la ductilité des structures, la formulation du matériau composite sera complètement différente.

La méthode Baron Lesage est basée sur deux hypothèses.

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

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

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

I.1.6.1-Optimisation des bétons de fibres métalliques par la méthode B.Lesage

Lors de l'utilisation de la méthode Baron Lesage, nous procéderons de la manière suivante [10] :

- Nous fixons au départ le rapport eau sur ciment(E/C) ainsi le pourcentage de fibres à incorporer.
- Nous faisons varier le rapport sable granulat(S/G) et nous déterminons pour chaque rapport, la maniabilité du béton de fibres .Nous pouvons ainsi tracer une courbe reliant la maniabilité et le rapport sable granulat (S/G) et ensuite déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est plus grande .Si on se réfère à la première hypothèse on considère dans ce cas que le rapport S/G est optimal figure I-2.

Temps d'écoulement (S)

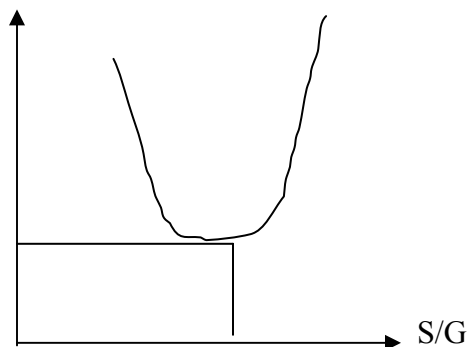


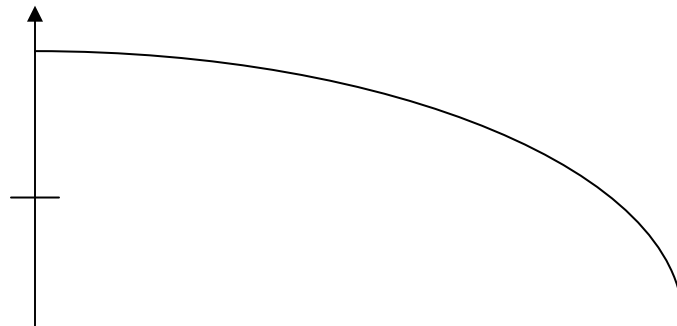
Figure I.2. Détermination du rapport S/G optimal [2,27]

- Sur la base de l'hypothèse n°2, on peut alors augmenter ou diminuer la quantité d'eau et ciment en gardant le rapport eau - ciment (E/C) afin d'obtenir la maniabilité souhaitée, cela conduit à un mélange comportant plus de pâte de ciment.

I.1.7- NOTION D'OUVRABILITE (MANIABILITE)

L'ouvrabilité d'un béton de fibres est fonction :

- Du dosage en volume des fibres et de l'élançement de la fibre ; l'ouvrabilité diminue lorsque le dosage en fibres et l'élançement de celles-ci sont importants.
- Les dimensions des granulats et leurs quantités relatives : l'ouvrabilité sera réduite avec des grandes quantités de gros granulats.
- De la géométrie et l'état de surface des fibres, une surface rugueuse peut augmenter le risque de formation de pelotes de fibres.



augmenter le risque de formation de pelotes de fibres.

1.1.7.1-Dosage en fibres

On obtient une diminution rapide de l'ouvrabilité avec une augmentation de la proportion volumique « v_f » des fibres incorporées ; en effet, l'incorporation d'un certain volume de fibres se traduit par une augmentation de la surface dans le mélange, qui par absorption d'eau tend à sécher le mélange; il en résulte une diminution de l'ouvrabilité figure I-3

Edington et AL ont montré; la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres.

- La teneur en fibres est fixée par une relation empirique dite « limite de faisabilité »

$$V_f^0 \cdot L/D < 3.$$

Avec : V_f^0 : Fraction volumique en fibres,

L/D : Elancement

Le dosage limite couramment utilisé pour les bétons de fibres métalliques est de l'ordre de $1,5 \div 2 \%$.

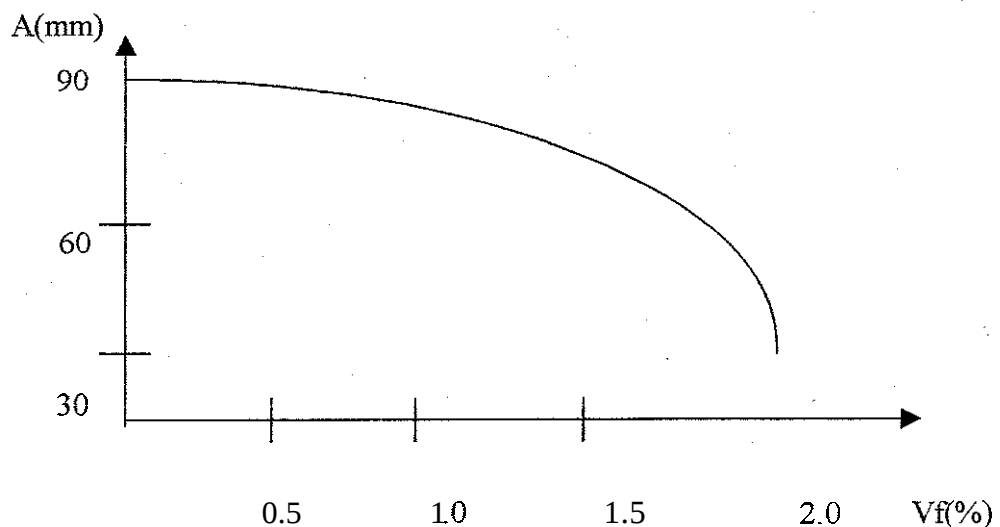


Figure I-3. Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône d'Abrams

I.1.7.2- Longueur et section de la fibre

La granulométrie des matériaux est étroitement liée aux dimensions géométriques des fibres, DEHOUSSE propose que la longueur soit celle qu'un nombre réduit de fibres suffisent à encadrer les granulats, en effet la longueur conditionne plutôt l'échelle à laquelle la fibre sera effective, figure I.4.

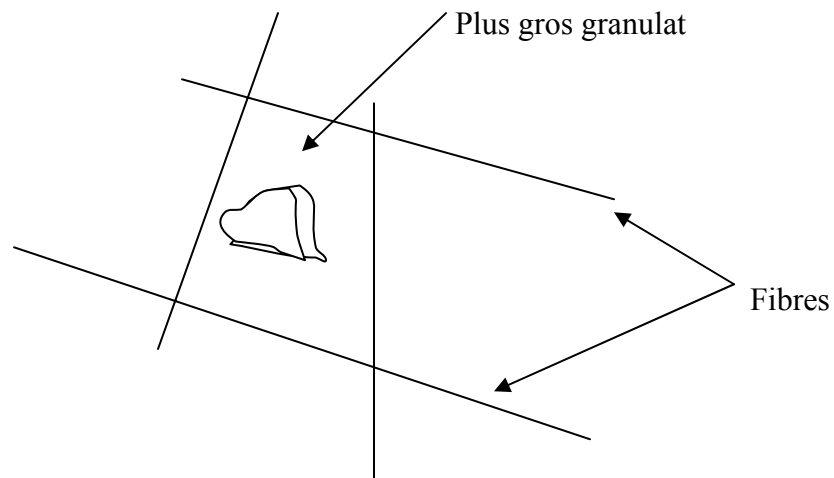


Figure I-4.Encardement d'un granulat :

Cas composite efficace mécaniquement

Pour que les granulats soient bien encadrés par les fibres, il est nécessaire d'avoir une matrice de béton riche en élément fins, donc une composition granulaire appropriée

s'avère nécessaire pour le béton armé afin d'obtenir une distribution uniforme de fibres dans le béton et parer à la formation de « pelotes » de fibres [8,25].

I.1.7.3- Influence des granulats

La granulométrie du mélange joue un rôle important sur la maniabilité, la présence de gros granulats crée des frictions inter particulaires qui tendent à réduire l'ouvrabilité.

Les fibres introduites dans le mélange interfèrent avec ces gros granulats et sont alors restreintes dans leurs possibilités de mouvement, ce qui affecte d'autant plus la maniabilité [1, 13, 16,25].

D'après la littérature, les fibres s'accommodent mieux au béton constitué d'éléments relativement fins, dont le diamètre maximal des grains est de l'ordre du quart de la longueur de la fibre (soit environ un diamètre maximal de l'ordre de 8 à 15 mm pour les fibres habituelles), exemple : Les bétons de sable.

I.1.7.4-Influence de la géométrie de la fibre

Swamy .R.N et Edgington (1973) ont remarqué que lorsque l'élancement (l/d) augmente, l'ouvrabilité du mélange diminue, ce qui explique la limitation de l'élancement des fibres à $L/D = 100$.

Hughes et Fattichi ont montré que la maniabilité du mélange diminue en fonction de la croissance de l'élancement des fibres (l/d), d'autre part, l'existence de crochets aux extrémités des fibres diminue l'ouvrabilité du composite.

Les difficultés dues à l'élancement ont pu être écartées grâce aux procédés de fibres dites accolées, les fibres dont l'élancement peut être égal ou supérieur à 100 sont accolées en plaquettes par 25 à 50, les plaquettes peuvent être introduites sans danger de formation de pelotes d'épingles (exemple : Fibres de Dramix) .

I.1.8- LES APPLICATIONS PRATIQUES DES BETONS DE FIBRES

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

Aujourd'hui, avec des dosages en fibres d'acier limités à 1% volumique (soit 80kg/m^3) l'industrie de la construction dispose d'un matériau performant (bonne maniabilité, bonnes performances mécaniques) et surtout économique au regard de certaines spécificités.

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

I.1.8.1-Les dalles

Les dalles d'aéroport ou les dalles industrielles sont soumises à des sollicitations complexes, charges importantes, poinçonnement, rotation ponctuelle, etc. Avec des fibres incorporées dans tout le volume de béton, le renforcement est quasi isotrope, ce qui évite des dégradations locales de ces structures.

Dans le cas des dalles, l'expérience a montré qu'un dosage adéquat de fibres (de l'ordre de 20 kg/m^3) peut avantageusement remplacer les treillis traditionnels, réduisant ainsi les coûts de construction [23].

I.1.8.2-les surfaçages

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

I.1.8.3-Béton projeté

L'utilisation d'un béton renforcé de fibres comme béton projeté apporte de nombreux avantages .En particulier les fibres peuvent remplacer les treillis traditionnels, par une réduction considérable de volume de béton nécessaire (il suffit de suivre le profil naturel de paroi).

I.1.8.4- Fondation de machines

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

Le béton de fibres permet de mieux répondre à ces exigences.

I.1.8.5- 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 de difficultés liées à la mise en place des cages d'armatures, ainsi il est employé en vue de remplacer totalement ou particulièrement les armatures traditionnelles [25].

I.1.8.6-Constuction hydraulique

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

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

- Quais : les fibres augmentent la résistance aux chocs ou au poinçonnement et à l'érosion.

I.1.8.7-Remplacement ou addition des fibres aux armatures transversales

Dans ce but un programme de recherche a été lancé par le CSTC, afin d'examiner, la possibilité de remplacement ou de renforcement de l'armature transversale, les résultats étaient les suivantes :

- L'utilisation de fibres d'acier peut être favorable si les tensions sont distribuées dans la section entière de béton, les sollicitations dues aux efforts tranchants sont mieux équilibrées.

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

- Le renforcement seulement par les 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 kg/m^3 dans la section entière.

I.2-COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS DE FIBRES

I.2.1-EFFET DES FIBRES DANS UNE MATRICE

I.1.2.1-Processus de fissuration dans le béton

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

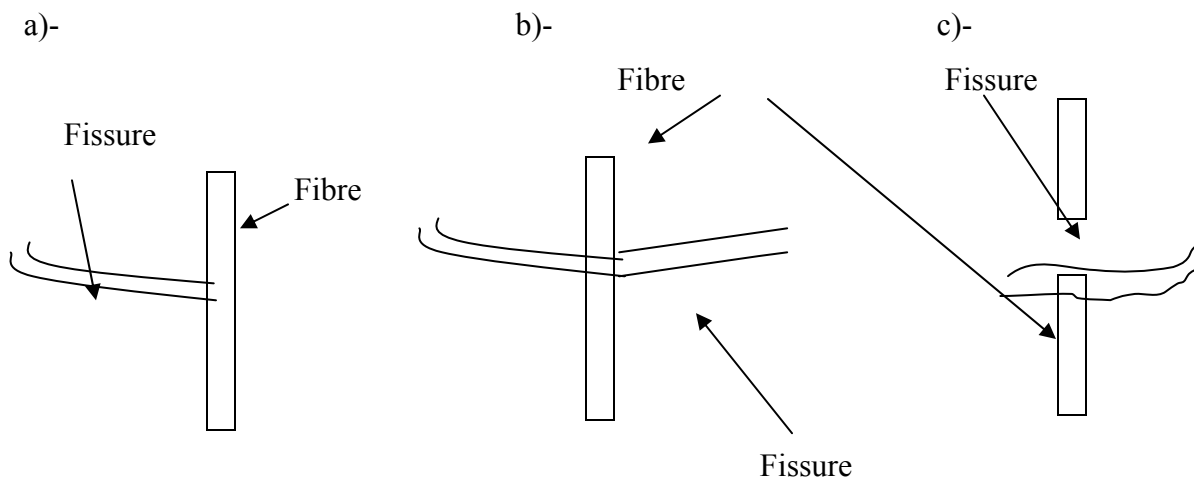


Figure I.5. Effet d'une fibre dans la matrice. [2]

P.Rossi a étudié l'apport de fibres à deux échelles différentes, celle du matériau et celle de la matrice [25].

A l'échelle du matériau ,les fibres interviennent en cousant les microfissures créées ,dans la mesure ou les fissures sont de tailles très réduites, il est préférable pour assurer un pontage de chacun d'eux d'utiliser des fibres très courtes mais en très grand nombre .

Avec la localisation de la fissure, le comportement du matériau devient un comportement structural, le rôle des fibres au niveau des microfissures s'apparente alors à l'action des armatures passives dans une structure de béton armé.

Les fibres doivent avoir une longueur, telle que la propagation des macro fissures pourra être limitée ou stoppée le plus longtemps possible (pour retarder la formation de la fissure magistrale et donc la rupture brutale).

I.2.1.2-Effet de l'orientation et de l'espacement des fibres

Dans un composite, la nature de l'orientation des fibres courtes constitue l'une des particularités essentielles des bétons renforcés de fibres Ainsi en 1972,Helft et Haris remarquaient qu'un travail de rupture supplémentaire était nécessaire pour un pourcentage donné de fibres lorsque celle-ci sont orientées aléatoirement par rapport au cas ou elles sont alignées.

Ils concluaient de leurs observations que, ce travail provenait de la déformation plastique en cisaillement des fibres non alignées. Ces auteurs travaillaient avec des fibres métalliques dans des matrices de résine polyester.

L'espacement moyen des fibres « s » est une notion de distance moyenne entre des fibres adjacentes dans la matrice .Romualdi et Al (1994) expriment l'efficacité de renforcement des fibres dans une matrice à l'aide de ce paramètre .Les auteurs proposent la formule suivante pour calculer l'espacement et surtout indiquent que la résistance à la traction du composite est inversement proportionnelle à l'espacement « s ».

$$s=13.8 \times D \times (1/V_f)^{1/2}$$

Avec : D : Diamètre des fibres.

V_f : Pourcentage volumique de fibres.

D'autres auteurs [Swamy et Co 1974 ; Schnutgen 1975] ont continué dans cette voie, en faisant intervenir le mécanisme de fissuration et de glissement des fibres ,introduisant également des facteurs pour tenir compte de la géométrie de la fibre d'une part et de leur distribution dans la matrice d'autre part .

Liqui et Al 1986 ont proposé une autre formule pour exprimer la résistance du composite « σ_c ».

$$\sigma_c = k(1/s - 1/s_m) + \sigma_{mu}$$

Avec : S : Espacement moyen

M : $0.002(1/d) + 0.4$.facteur d'efficacité de la fibre.

L : Longueur de fibres.

D : Diamètre de fibres.

V_f : Pourcentage de fibres

K : Coefficient correspondant à l'adhérence fibre –matrice.

s_m : Espacement maximal capable de renforcer la matrice avec des fibres.

σ_{mu} : Résistance de la matrice .

Des concepts purement géométriques sont rapidement devenus caducs car ils tiennent compte que de la géométrie propre des fibres, comme son élancement par exemple mais non du dosage en fibres.

Aujourd'hui cette notion d'espacement des fibres, ne constitue plus un paramètre d'étude des bétons renforcés de fibres et ne reflète pas assez réellement l'association fibre - matrice.

I.2.1.3-Influence de l'adhérence fibre - matrice

L'adhérence fibre - matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice .D'après Bartos (1981), l'adhérence entre fibre et la matrice est assurée par trois liaisons ;

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

Des essais d'arrachement par Eurosteel , sur les fibres ondulées (1982), montrent que la résistance d'adhérence τ_u dépend de la teneur en ciment dans la matrice. Il existe une teneur optimale de ciment pour que la résistance d'adhérence atteigne sa valeur maximale, cette teneur en ciment est voisine de 400 à 500 kg/m³.

I.2.1.4-Influence de la géométrie de la fibre

D'après quelques études faites avec ce genre de fibres, il s'est avéré que seules les fibres munies de crochets ou ondulées (par exemple une fibre en acier tréfilé ondulé) ont révélé des caractéristiques remarquables d'ancrage.

Géométrie de la fibre :

D=1 mm

L=60 mm

Résistance de l'acier, $\sigma_R=120 \text{ kg/mm}^2$.

Géométrie : 7 ondes réparties sur les 60 mm.

Par le procédé d'ondulation, deux effets importants sont obtenus :

- L'énergie totale de rupture en traction de la fibre d'acier est multipliée par 2.5, si l'on prend comme référence le fil constitutif naturel, la plastification de l'ondulation libère une énergie bénéfique au béton.
- Les ondulations réparties sur toute la longueur de la fibre donnent naissance, dans le mortier d'enrobage à des réactions de butées qui s'opposent ou déchaussement de la fibre .La tension d'extraction (pull out strength), suivant les compositions du mortier ou du béton, varie de 60 à 90kg / mm².

De nombreux essais de flexion sur plaque de béton révèlent un processus de fissuration progressif et une répartition des fissures bien meilleure ; après l'apparition d'une fissure, d'autres apparaissent encore dans son voisinage [2,3 ,8 et 25]

Suite à des essais d'extraction d'une fibre ondulée ancrée dans une matrice. Chanvillard .G formule les observations suivantes :

- Le comportement est totalement réversible, les déformations de la fibre et de la matrice sont entièrement compatibles.

- L'augmentation de l'effort sur la fibre produit un éclat de la matrice au niveau de la fissure par effet de bord.

- La fibre se trouve alors dégagée sur une longueur libre, simultanément le décollement de la fibre va se poursuivre jusqu'au décollement total, cette phase peut engendrer des déplacements au niveau de la fissure de quelques dixièmes de millimètres alors que l'extrémité ancrée de la fibre restée sensiblement immobile.

- Chaque élément de fibre, lors de déplacement, subit des variations de courbure qui si elles sont suffisamment importantes, peuvent créer des déformations plastiques au sein de l'acier de la fibre, dissipant alors une énergie considérable, c'est ce seul phénomène qui permet de justifier ce redressement de la fibre après extraction complète, et que l'on peut qualifier d'ancrage mécanique.

Conclusion du chapitre

Les innovations constructives, qui font souvent appel à de nouveaux matériaux, ont rendu les ciments renforcés de fibres très populaires. L'introduction des fibres dans la matrice cimentaire donne la possibilité d'améliorer la résistance à la traction

et au choc, permet d'envisager une réduction du poids et de l'épaisseur des éléments et devrait réduire les dommages attribuables au transport et à la manutention.

L'analyse des différents travaux antérieurs permet de conclure que l'utilisation des fibres métalliques courtes dans le béton permet non seulement d'améliorer les caractéristiques mécaniques telles que les résistances ; la rigidité mais également les autres propriétés physiques sauf que la quantité de fibres à utiliser est très importante d'où une recherche dans le but de réduire cette quantité, sans amoindrir les performances mécaniques est d'actualité.

Dans un but d'économie de matériaux, gain d'énergie et d'optimisation du travail de la section sous chargement statique et dynamique, nous proposons une approche qui consiste à remplacer la section de calcul "A" par une combinaison de la section minimale " $A_{\min}$ " exigée par les règlements de calcul et normes avec un pourcentage de fibres métalliques, dans un rapport de proportionnalité. La somme de ces deux dernières sections est au plus équivalente à la section totale "A".

Cette approche constitue le but de notre travail. Elle sera développée théoriquement dans le second chapitre et analysée expérimentalement dans les autres chapitres.

Chapitre II

*Approche Du Comportement
Mécanique Et Modélisation
Statique Des Poutres Soumises
En Flexion*

CHAPITRE II : APPROCHE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET MODELISATION STATIQUE DES POUTRES SOUMISES EN FLEXION

INTRODUCTION

Un état limite correspond à un état particulier dans lequel la condition requise d'exploitation et de résistance est strictement satisfaite. La variabilité de la résistance et des autres propriétés physico-mécaniques de la matrice cimentaire composite est tributaire des propriétés intrinsèques de ces constituants à savoir, pour un élément de poutre travaillant en flexion, celles du béton et de l'acier.

Les règles et normes actuelles, permettent de déterminer la section A d'armatures nécessaire pour un effort sollicitant donné.

Afin d'améliorer le comportement mécanique de l'élément et de palier à l'inconvénient fort malheureusement connu du béton armé et pour conférer une meilleure ductilité, une substitution totale des aciers traditionnels par des fibres a été largement traitée dans les travaux antérieurs [2,3,8,23,24].

Dans un but de conférer à la section une meilleure résistance à la fissuration et à la rupture, on effectue une combinaison de ferraillement traditionnel égale au ferraillement minimal exigé par les règles de calcul « $A_{\min}$ » avec un ajout de fibres courtes métalliques en proportion limitées, dont la somme des deux sera égale ou inférieure à la section d'armatures équivalente calculée « A_e ». L'intérêt de cette approche est de permettre de rendre la matrice plus ductile, plus résistante, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie.

Pour effectuer une modélisation correcte du comportement, il est indispensable de connaître d'une manière aussi précise la loi de contrainte-déformation. Donc il est impératif de rappeler les différentes lois de comportement du béton, de l'acier et du béton armé de fibres.

II.1. RAPPEL DES DIFFERENTES LOIS DE COMPORTEMENT

II.1.1. Comportement du béton en compression

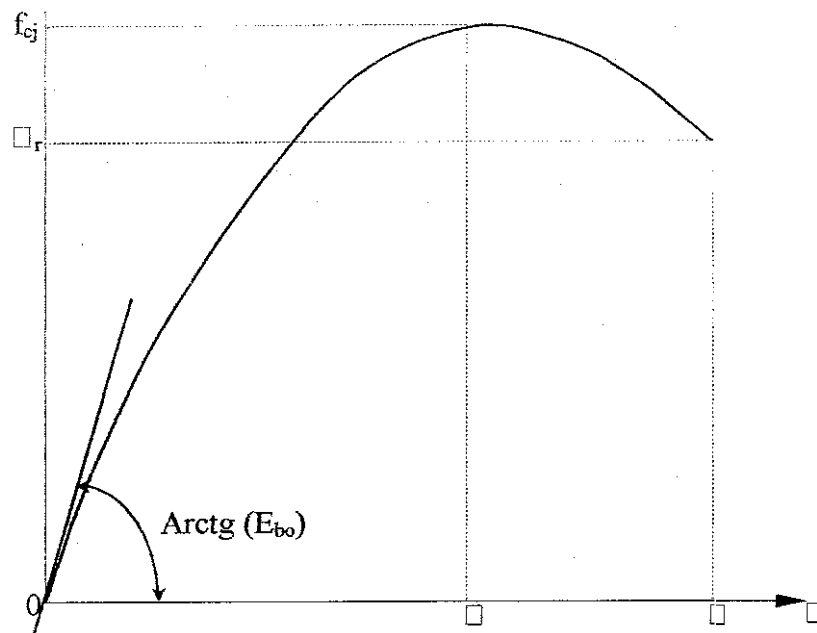


Fig. II.1: Comportement du béton en compression selon SARGIN [26]

Pour le béton en compression, nous avons utilisé la loi de Sargin [26] présentée à la figure ci dessus (Figure II.1), La contrainte σ est donnée par la relation :

$$\sigma = f_{cj} \frac{k_b \bar{\varepsilon} - (k'_b - 1) \bar{\varepsilon}^2}{1 + (k_b - 2) k'_b \bar{\varepsilon}^2} \quad (11.1)$$

Où $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

Notation :

K_b : paramètre ajustant la courbe ascendante : $K_b = \frac{E_{b0} \varepsilon_0}{f_{cj}}$

f_{cj} : résistance à la compression du béton à j jours ;

ε_0 : déformation de pic correspondant à f_{cj} ;

E_{b0} : module élastique du béton à l'origine ;

K_b est un paramètre permettant d'ajuster la branche décroissante de la courbe :

- Pour $K_b = 0$, le béton a un comportement élastique fragile et la branche descend brutalement.

- Pour $k_b = 1$, le béton a un comportement ductile et la branche est assez plate. En général, pour un béton normal, on peut prendre :

$$k_b = K_b - 1$$

11.1.2. Comportement des aciers naturels (passifs) dans la zone comprimée

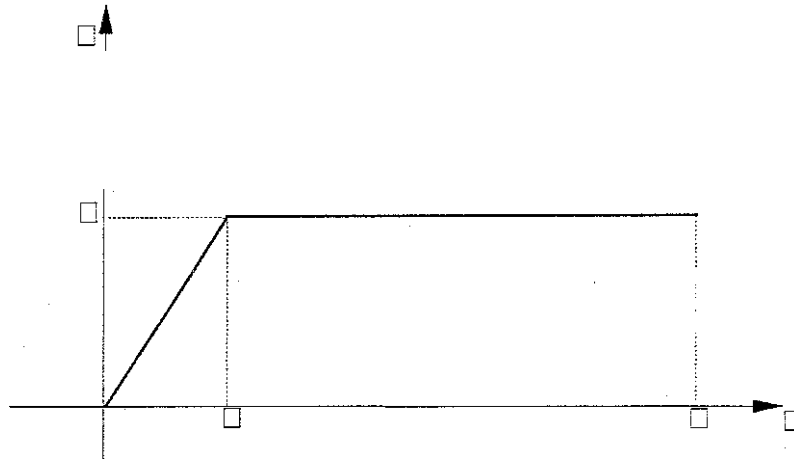


Fig. II.2: Comportement des aciers naturels

En générale, une loi de comportement élasto -plastique parfaite caractérise les aciers naturels (figure II.2) on a :

$$\left. \begin{array}{ll} \sigma = E_s \cdot \varepsilon & \text{pour } \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ \sigma = \sigma_e & \text{pour } \varepsilon_e \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ \sigma = 0 & \text{pour } \varepsilon > \varepsilon_u \end{array} \right\} \quad (II.2)$$

Notation :

E_s : module longitudinal de l'acier,

ε_e : déformation limite élastique de l'acier,

σ_e : contrainte élastique de l'acier,

ε_u : déformation ultime de l'acier

II.1.3. Comportement des aciers écrouis (passifs) dans la zone comprimée

Les règlements préconisent un comportement linéaire élastique jusqu'à 70% de σ_e puis au-delà, une courbe $\varepsilon = f(\sigma)$ du cinquième degré (Figure II.3).[26].

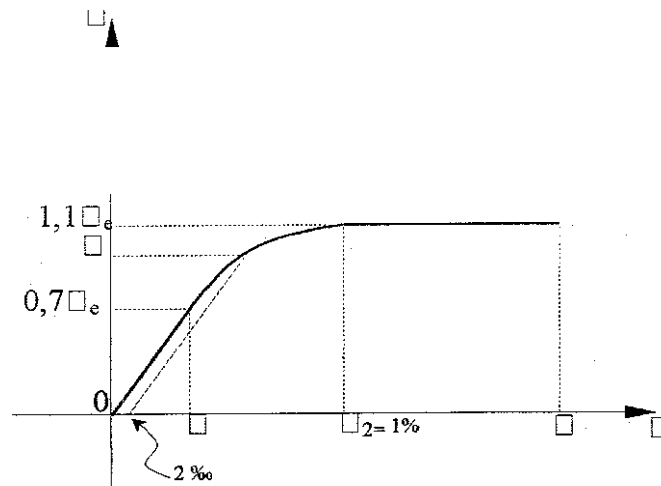


Fig. II.3: Comportement des aciers écrouis [26]

Les relations se traduisent par :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_s \varepsilon && \text{pour } \sigma \leq 0,7\sigma_e \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E_s} + 0,823 \left(\frac{\sigma}{\sigma_e} - 0,7 \right)^5 && \text{pour } 0,7\sigma_e \leq \sigma \leq 1,1\sigma_e \\ \varepsilon &= 1,1\varepsilon_e && \text{pour } 1\% < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{aligned} \right\} \quad (11.3)$$

II.1.4. Comportement des aciers actifs

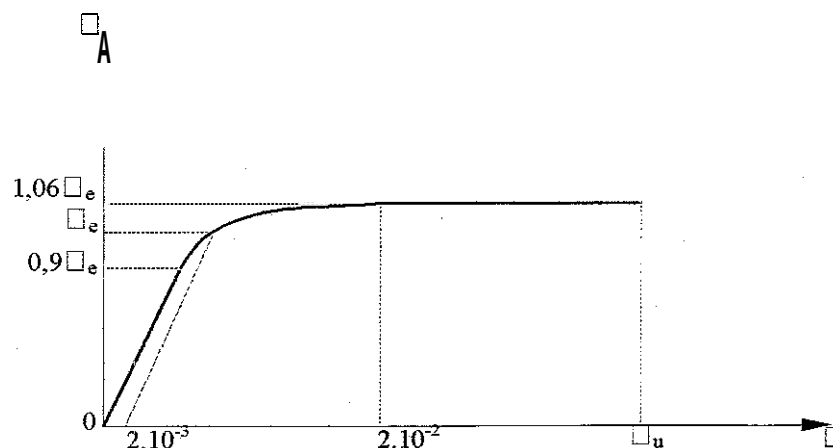


Fig. II.4 :Loi σ - ε d'un acier de précontrainte

L'allure des courbes est la même que celles des aciers écrouis (Figure 11.4) mais avec les relations suivantes:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_s \varepsilon && \text{pour } 0 < \sigma \leq 0,9 \sigma_e \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E_s} + 100 \left(\frac{\sigma}{\sigma_e} - 0,9 \right)^5 && \text{pour } 0,9 \sigma_e \leq \sigma \leq 1,06 \sigma_e \\ \sigma &= 1,06 \sigma_e && \text{pour } \varepsilon > 2\% \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

II.1.5. Diagramme fictif des aciers (naturels écrouis) en traction.

Ces aciers sont enrobés de béton, les différentes theories developpees dans les ouvrages du beton armé préconisent les diagrammes σ - ε suivant jusqu'à la limite du diagramme linéaire (fig II.5 et fig.II.6)

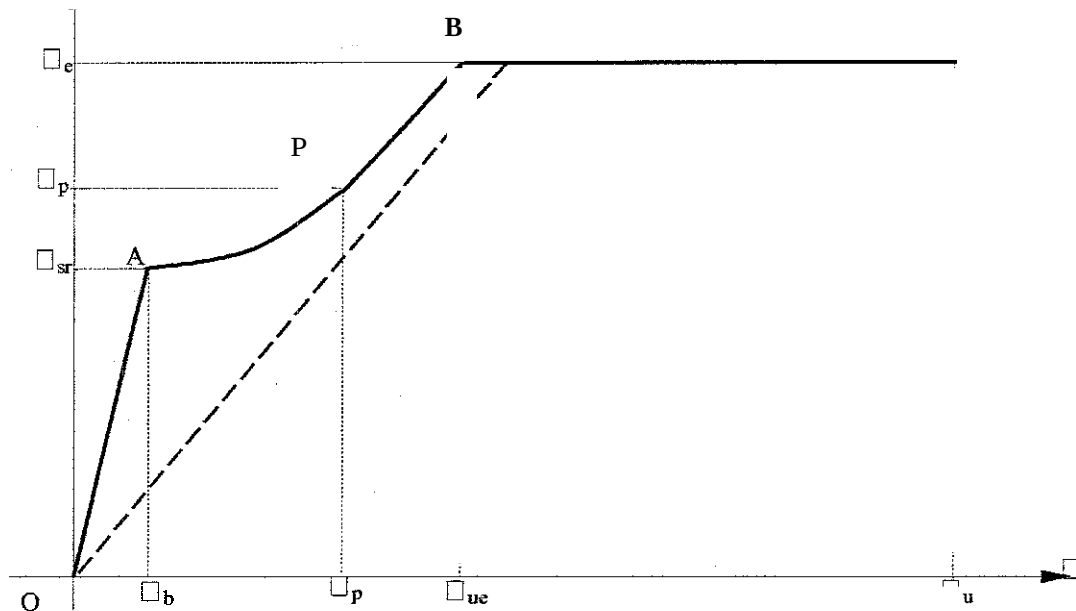


Fig. II.5: Diagramme fictif σ - ε de l'acier naturel en traction

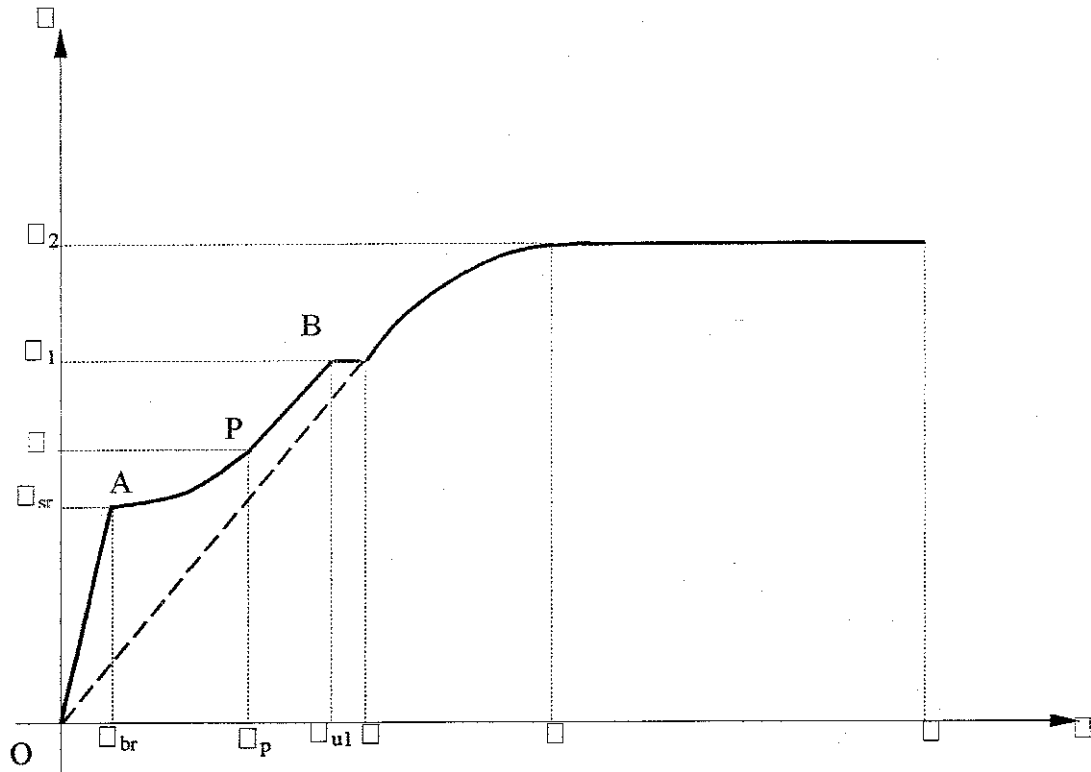


Fig. II.6: Diagramme fictif σ - ε de l'acier écroui en traction

a) Pour les aciers naturels (Fig. II.5)

La loi de comportement est donnée par (II.5)

$$\left. \begin{array}{l} \text{*Relations} \\ \text{*}\sigma = \sigma_e \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{pour } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{ue} \\ \text{pour } \varepsilon_{ue} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{array} \quad (11.5)$$

b) Pour les aciers écrouis (Fig. II.6)

La loi de comportement est donnée par (11.6)

$$\left. \begin{array}{l} \text{*Relations} \\ \text{*}\sigma = 0,7\sigma_e \\ \text{*}\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + 0,823 \left(\frac{\sigma}{\sigma_e} - 0,7 \right)^5 \\ \text{*}\varepsilon = 1,1\sigma_e \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{pour } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u1} \\ \text{pour } \varepsilon_{u1} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ \text{pour } 0,7\sigma_e \leq \sigma \leq 1,1\sigma_e \\ \text{pour } \varepsilon_2 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{array} \quad (11.6)$$

II.2. BETON ARME DE FIBRES D'ACIER

a) Comportement en compression

L'allure et la loi de comportement sont les mêmes que celles du béton traditionnel (Figure II.7 et relation II.1).

b) Comportement en traction (figure II.7)

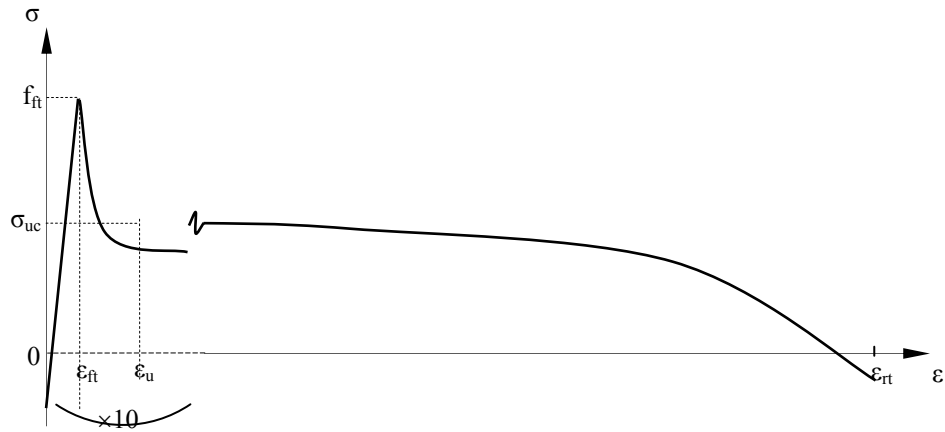


Fig. II.7: Comportement du béton de fibres d'acier en traction [8, 26]

Les différentes relations régissant ce comportement sont données comme suit [8] :

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma &= E_{ct} \varepsilon & si \quad 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{ft} \\
 \sigma &= \sigma_{uc} - \left[\sigma_{uc} - f_{ft} \right] \frac{(\varepsilon - \varepsilon_u)^6}{(\varepsilon_{ft} - \varepsilon_u)^6} & si \quad \varepsilon_{ft} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u \\
 \sigma &= \sigma_{uc} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_u)^6}{(\varepsilon_r - \varepsilon_u)^6} \right] & si \quad \varepsilon_u \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r
 \end{aligned} \right\} \quad (II.7)$$

Notation :

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

f_{ft} : résistance à la traction du composite

ε_{ft} : déformation de fissuration du béton.

ε_u : déformation correspondant à la mobilisation totale de l'adhérence fibres matrice.

σ_{uc} : contrainte ultime maximale du composite (valeur « plateau »)

ε_{rt} : déformation de rupture du composite en traction.

II.3. RELATIONS D'EQUILIBRE ET ETAT DES CONTRAINTES

II.3.1. Cas d'une section armée traditionnellement.

Soit la section armée traditionnellement, représentée par la figure II.9 , dont les caractéristiques géo- mécaniques sont représentées sur le tableau II.1 [30].

Tableau II.1. Caractéristiques de la section droite.

Paramètres	Formulation mathématique
S	$\frac{b \cdot y_1^2}{2} + n \cdot A' \cdot (y_1 - d') - n \cdot A_t \cdot (d - y_1) = 0$
I_x	$\frac{b \cdot y_1^3}{3} + n \cdot A' \cdot (y_1 - d')^2 - n \cdot A_t \cdot (d - y_1)^2$
σ_{bc}	$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot y_1$
σ_{sc}	$\sigma_{sc} = n \cdot \frac{M_{ser}}{I} \cdot (y_1 - d')$
σ_{st}	$\sigma_{st} = n \cdot \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - y_1)$

L'expression du moment M_{ser} est donnée par la relation suivante :

$$M_{ser} = \frac{b \cdot y_1^2 \cdot \sigma_{st}}{2 \cdot n \cdot (d - y_1)} \cdot \left[d - \frac{y_1}{3} \right]$$

(II.8)

II.3.2. Cas d'une section armée de fibres métalliques.

Pour une section en béton seul, la rupture est fragile. Elle se produit dès que la déformation maximale atteint « ε_t » (déformation correspondante à la résistance à la traction du béton).

Pour une section en BAF (béton armé de fibres), il y a fissuration puis plastification progressive avec déplacement de l'axe neutre, il en résulte une augmentation du bras de levier des efforts internes. La rupture aura lieu quand l'allongement maximal atteint « $K.\varepsilon_t$ », où $K>1$ dépend du type de fibres, leur nature et la géométrie [8].

Le comportement du BAF est idéalisé par un diagramme élastique plastique « équivalent » à la loi du comportement réel figure II.8. Les caractéristiques géo mécaniques sont représentées sur le tableau II.2.

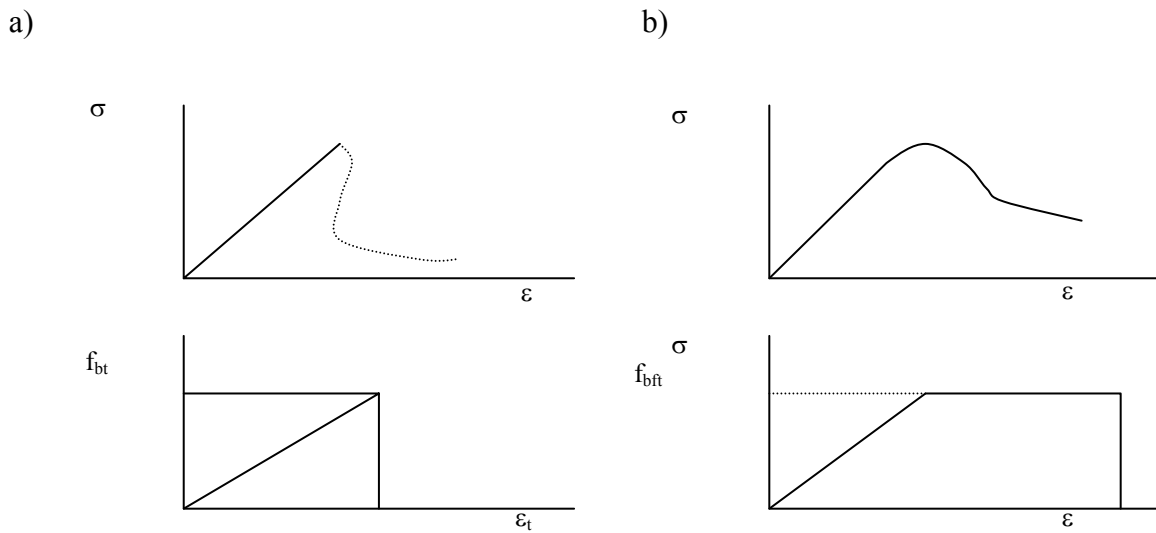


Fig.II.8 : Lois de comportement réel et simplifié [8]

Tableau II.2. Caractéristiques de la section (2)

Paramètres	Formulation mathématique
Axe neutre « x/h »	$\frac{\frac{1}{K} - 2 + \sqrt{2K - 1}}{K + \frac{1}{K} - 2}$

coefficient « K »	$K = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{ft}}$
flexion « M/M_0 »	$\frac{M}{M_0} = 2 \cdot K \cdot \frac{(x/h)^3}{1-x/h} + 3 \left(1 - \frac{1}{3 \cdot K^2} \right) \left(1 - \frac{x}{h} \right)^2$
$\sigma_{\text{moy}} / \text{fibre}$ « σ_{um} »	$\sigma_{\text{um}} = \frac{\tau_u}{\phi} \cdot l_f$

II.3.3. Cas d'une combinaison de ferrailage : A_{min} plus % des fibres métalliques.

La partie tendue étant ferrillée par la section minimale « A_{min} », renforcé par un ajout de fibres en proportion limitée dont la section étant égale ou inférieure, selon la cas, à $A_c - A_{\text{min}}$ (fig.II.9). Les caractéristiques géo mécanique sont représentées dans les tableaux II. 3. et II.4.

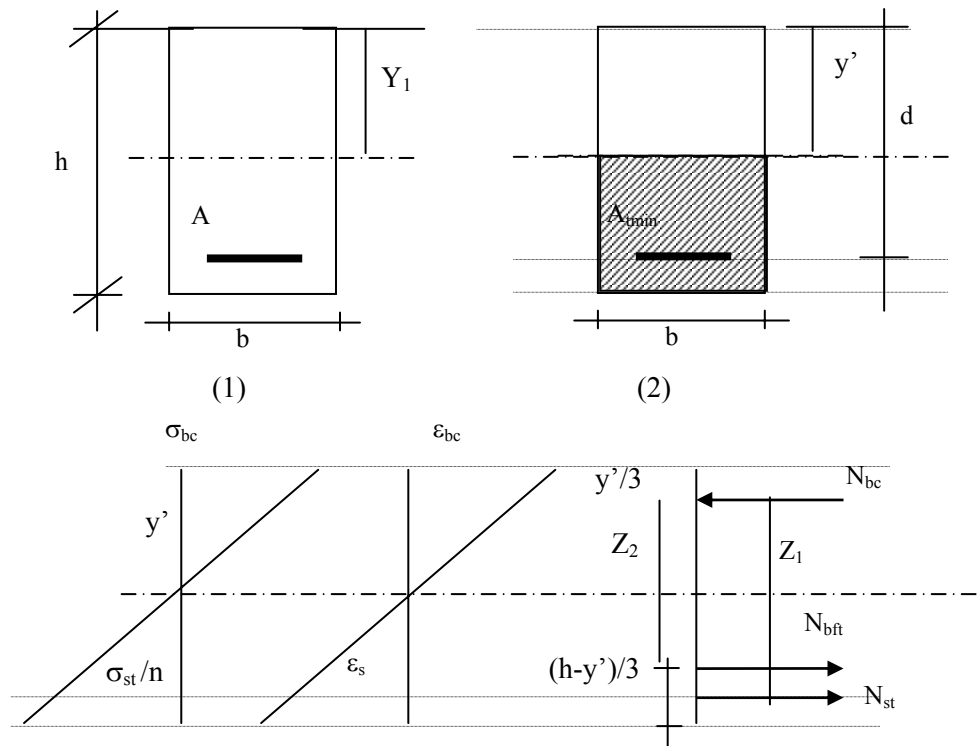


Fig.II.9. : Etats d'équilibres des sections.

(1) section béton armé ordinaire, (2) section combinée BAF

Tableau II. 3. Caractéristiques de la section à ferrailage combiné.

Paramètres	Formulation mathématique
S	$\frac{b(y')^2}{2} - nA_{\min}(d - y') - \frac{b(h - y')^2}{2}(1 + n\mu) = 0$
I_x	$\frac{b(y')^3}{3} + nA_{\min}(d - y')^2 - \frac{b(h - y')^3}{3}(1 + n\mu)$
σ_{bc}	$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot y'$
σ_{bft}	$\sigma_{bft} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot (h - y')$
σ_{st}	$\sigma_{st} = n \cdot \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - y')$

En utilisant le diagramme contrainte - déformation, on obtient les relations suivantes :

Tableau II.4. Relations d'équilibre

Paramètres	Formulation mathématique
Relations d'équilibre	$b \frac{\sigma_b^c}{2} y' = A_{\min} \sigma_{st} + \frac{b \sigma_{bf}^t (h - y')}{2}$ $Z_1 = d - y'/3, \quad Z_2 = 2h/3$
Relations : ε - σ	$\sigma_{bc} = E_b \cdot \varepsilon_{bc}; \quad \sigma_{st} = E_s \cdot \varepsilon_{st};$ $\sigma_{bft} = E_{bf} \cdot \varepsilon_{bf}$
section homogénéisée	$\frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{st}/n} = \frac{y'}{d - y'}, \quad \frac{\sigma_{bft}}{\sigma_{st}/n} = \frac{h - y'}{d - y'}$

Tenant compte des relations précédentes, l'expression du moment Mu (moment de rupture) par rapport aux armatures tendues $A_{\min}$ est donnée comme suit :

$$Mu = N_{bc} \cdot Z_1 - N_{bft} \cdot \left[\frac{h - y'}{3} - c \right] \quad \text{avec } c : \text{Enrobage de l'armature.}$$

$$Mu = \frac{by'^2}{2n} \left(d - \frac{y'}{3} \right) \left[\frac{\sigma_{st}}{d - y'} \right] - \frac{b}{2} (h - y') \left[\frac{h - y'}{3} - c \right] \sigma_{bft}$$

(II.9)

$$N_{bt} = \frac{1}{2} \sigma_{ft} b (h - y')$$

D'autre part on a la relation suivante :

$$\sigma_{bft} = (1 - \mu) \cdot \sigma_{bt} + \mu \cdot \sigma_{ft}$$

(II.10)

En injectant la relation (II.10) dans (II.9), on obtient une nouvelle équation de Mu en fonction du pourcentage de fibres d'acier.

$$M_u = \frac{1}{2} \sigma_{bc} b \cdot y' \left(d - \frac{y'}{3} \right) + \left[\frac{1}{2n} \mu_f \sigma_f + (1 - \mu_f) \sigma_b \right] \frac{b}{2} (h - y') \left[c - \frac{h - y'}{3} \right]$$

(II.11)

Le moment de fissuration Mser est donné ; lorsque la contrainte dans le béton de fibre est atteinte, soit, la répartition des contraintes dans la section du béton de fibres est considérée comme rectangulaire.

$$M_{ser} = F_{ft} \frac{3h + y'}{6} + A_s \sigma_s \left(d - \frac{y'}{3} \right).$$

(II.12)

II.4. Exemple d'application.

Afin d'estimer l'apport de l'ajout de fibres dans la zone tendue de l'élément considéré, en adéquation avec l'approche présentée, on traitera un exemple de calcul du moment de rupture (Mu) et (Mser) selon les expressions II.11 et II.12.

h cm	C cm	B cm	Ac cm ²	A _{min} cm ²	f _e Mpa	fc ₂₈ Mpa
14	3	14	2T12	2T6	400	31.70

Remarque : Les données de calcul à introduire dans l'organigramme de calcul (Excel) sont identiques à celles utilisées pour l'expérimentation ; à savoir la même section ; le même diamètre des fibres et les pourcentages ; la même section d'acier traditionnel etc. ceci permettra par la suite de confronter les résultats théoriques et expérimentaux.

Les résultats de calcul sont présentés dans les figures II.10, II.11, II.12 , II.13 et II.14.

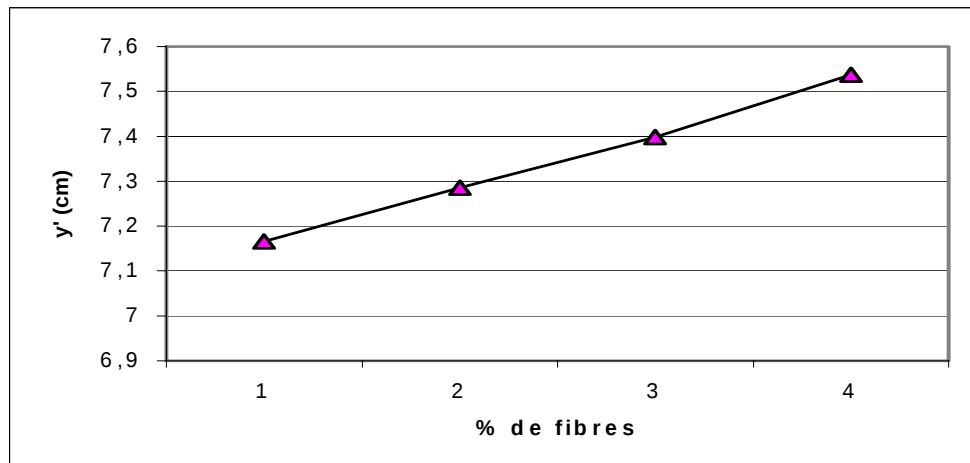


Figure II.10. Variation de la position de l'axe neutre en fonction du pourcentage de fibres

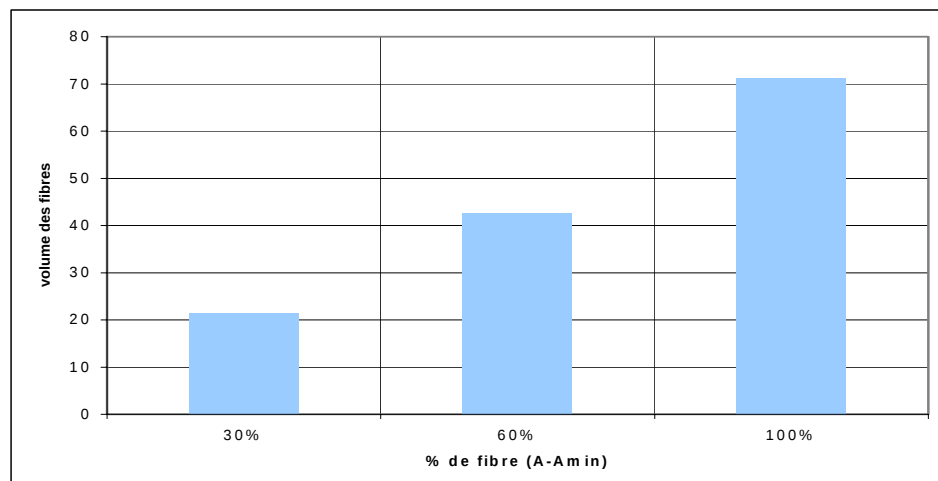


Figure II.11. Variation du volume des fibres en fonction du pourcentage de fibres

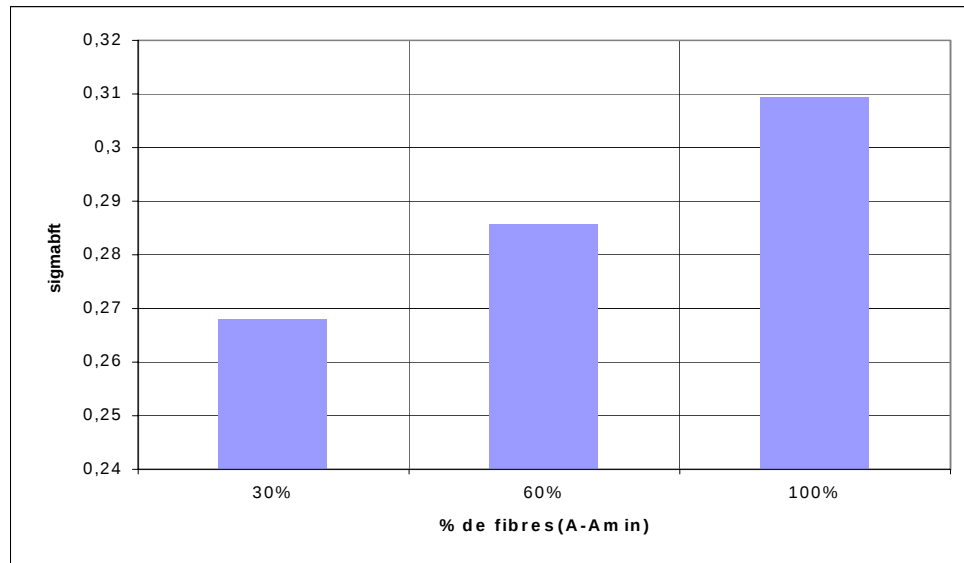


Figure II.12. Variation de la contrainte du béton de fibres en fonction du pourcentage de Fibres.

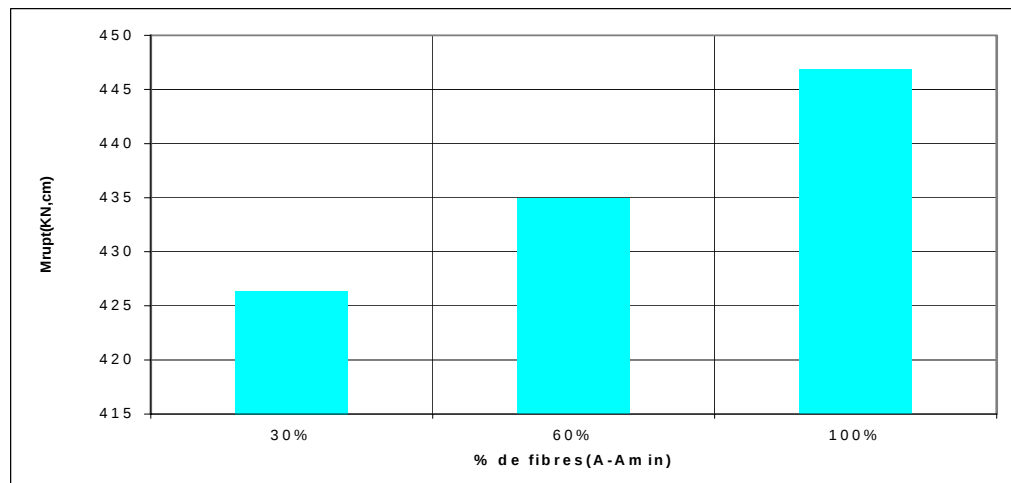


Figure II.13. Variation du moment de rupture 'Mu' en fonction du pourcentage de fibres

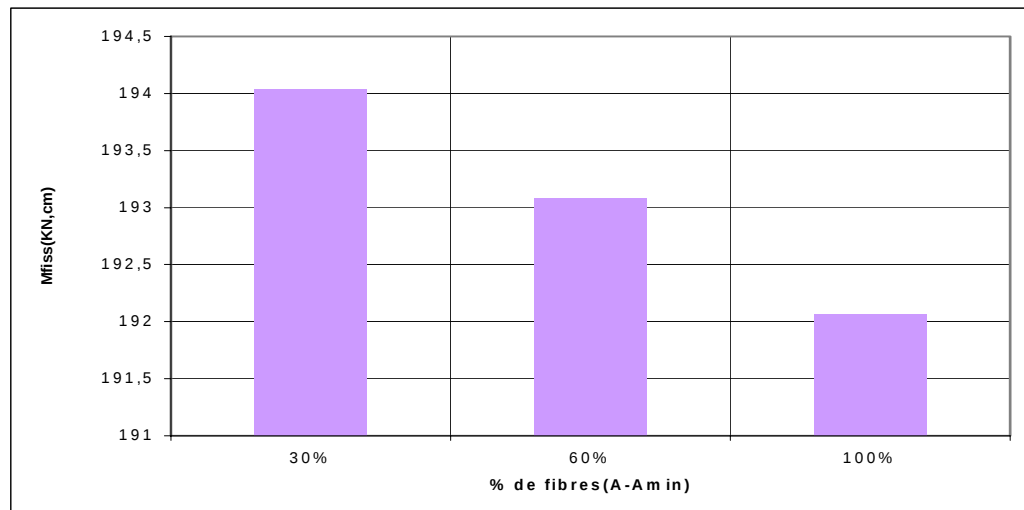


Figure II.14. Variation du moment de fissuration 'Mser' en fonction du pourcentage de Fibres.

Conclusion du chapitre.

En établissant les relations d'équilibre basées sur l'hypothèse des sections planes et sur les caractéristiques intrinsèques des constituants en l'occurrence le béton, l'acier traditionnel et les fibres de renforts ; la formulation mathématique des éléments de réduction, en particulier le moment de rupture et de fissuration , en fonction du pourcentage de fibres en tenant compte du mode de comportement , à savoir la répartition des contraintes dans la section transversale de l'élément soumis en flexion, a permis de mettre en évidence la contribution des fibres de renforts incorporées seulement dans la zone tendue, à travers l'effort ' N_{bft} ' développé par le béton de fibres.

La confrontation des résultats sera établie dans le chapitre suivant.

Chapitre III
Identification Physico-chimique
Des Constituants

Chapitre III. IDENTIFICATION PENSICO-CHIMIQUE DES CONSTITUANTS

III.1-GENERALITES

Les betons armes de fibres ont fait l'objet, depuis une quarantaine d'années, de nombreuses recherches de par le monde. Leur utilisation est très intense dans le domaine des dallages industriels et dans celui d'assainissement. Le domaine d'utilisation peut être étendu aux chaussées de parkings d'aéronautique. Sa capacité de résistance aux chocs et à l'abrasion peut intéresser bien d'autres domaines de l'industrie.

Par contre, son utilisation est beaucoup moins importante dans les structures classiques en béton armé (ouvrages d'art, bâtiments, ...).

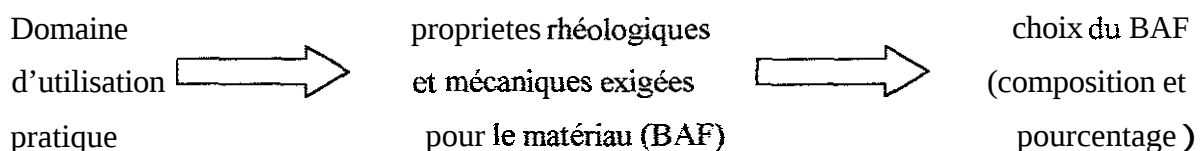
Dans la présente étude expérimentale, nous nous intéressons à étudier des fibres « de récupération » et leur influence sur l'amélioration des performances physiques et mécaniques des matrices cimentaires. Ces fibres proviennent des déchets de câbles de freins des vélos et motocycles, accélérateurs (automobiles, motos, ...). Des essais mécaniques (compression, flexion) sont réalisés sur des éprouvettes afin, de caractériser le comportement des bétons armés de ces fibres.

Une comparaison sera faite pour une section sans et avec renfort de fibres. L'influence du paramètre « μ_f » (pourcentage de fibres) sera mise en évidence. Ceci permettra d'obtenir une certaine économie de ferrailage nécessaire pour un effort sollicitant donné.

III.2- MATERIAUX UTILISES

III.2.1-Analyse des matériaux

L'analyse de la composition de ces matériaux doit être effectuée suivant le domaine d'utilisation pratique visé. A chaque type de fibres et en pourcentage fixe, correspond une composition donnée (optimisée). Le squelette granulaire (granulats, sable, ...) doit être optimisé en fonction du type et du pourcentage en fibres incorporées. Cette démarche méthodologique peut être schématisée comme suit :



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 et 15/25) de la carrière Ammal . L'analyse granulométrique par tamisage a été réalisée suivant la norme NF P18-560, avec une tamiseuse à fréquence réglable, de 50 Htz. 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 5000g pour le gravier 15/25.Ils ont été, au préalable, lavés et séchés. Les résultats sont résumés dans les tableaux III-2.2.1,III-2.2.2. et III-2.2.3.les modules des tamis (m_{tam}) sont calculés à partir de la formule (III-1)ou ,D représente le diamètre des mailles des tamis .

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

III.2.2. Résultats des essais granulométriques et physiques:

III.2.2.1. Analyse granulométrique du sable : NF P18.560

échantillon : SABLE.			
Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1s}/M_{1h} $M_{1s}= 471.0 \text{ g}$ $M_{1h}=500.0\text{g}$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=1500.0\text{g}$ Masse totale sèche : $M_s=(M_{1s}/M_{1h}) M_h=1413.0\text{g}$ Masse sèche après lavage : $M_{s1}=1345.0\text{g}$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	3.0	0.21	99.79
4	9.0	0.64	99.36
3.15	40.0	2.83	97.17
2.5	112.0	7.93	92.07
1.25	488.0	34.54	65.46
0.63	826.0	58.46	41.54
0.315	1128.0	79.83	20.17
0.16	1275.0	90.23	9.77
0.125	1319.0	93.35	6.65
0.08	1343.0	95.05	4.95
Fond de tamis :	1345.0	95.19	4.81
	$R_n=1343.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=2.0\text{g}$	Observation : sable analysé et caractérisé par un module de finesse $M_f=2.75$ pourcentage en particules fines : $\zeta =4.81\%$.		
$R_n + T_n=1345.0\text{g}$			

$100(M_{S1} - (R_n + T_n)) / M_{S1} = 0.0$	taux d'humidité : w = 6.16%
--	------------------------------------

-Essai : Equivalent de sable :

Tableau III-1. Équivalent de sable

Nature	Es	
	A vue	Au piston
Sable	47.67	47.04

III.2.2.2. Analyse granulométrique du gravier 8/15: NF P18.560

échantillon : GRAVIER 8/15			
Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h} $M_{1S} = 646.0g$ $M_{1h} = 650.0g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h = 3000.0g$ Masse totale sèche : $M_s = (M_{1S}/M_{1h}) M_h = 2981.5g$ Masse sèche après lavage : $M_{S1} = 2870.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
16	0.00	0.00	100.0
12.5	66.0	2.21	97.79
10	494.0	16.57	83.43
8	1321.0	44.31	55.69
6.3	2368.0	79.42	20.58
5	2643.0	88.65	11.35
Fond de tamis :	2870.0	96.26	3.74
	$R_n = 2643.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n = 227.0g$	Observation : propreté superficielle : $\xi = 3.74\%$ Taux d'humidité : w = 0.61%		
$R_n + T_n = 2870.0g$			
$100(M_{S1} - (R_n + T_n)) / M_{S1} = 0.0$			

III.2.2.3. Analyse granulométrique du GRAVIER 15/25: NF P18.560

échantillon : GRAVIER 15/25			
Premier échantillon pour établissement du rapport M_{1S}/M_{1h} $M_{1S}= 649.0g$ $M_{1h}=650.0g$			
Deuxième échantillon pour analyse granulométrique : $M_h=5000.0g$ Masse totale sèche : $M_s=(M_{1S}/M_{1h}) M_h=4992.3g$ Masse sèche après lavage : $M_{S1}=4911.0g$			
Tamis Ouverture (mm)	Masse des refus cumulés (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
25	0.00	0.00	100.0
20	708.0	14.18	85.82
16	2262.0	45.31	54.69
12.5	4380.0	87.73	12.26
10	4785.0	95.85	4.15
8	4853.0	97.21	2.79
6.3	4878.0	97.71	2.29
5	4904.0	98.23	1.77
Fond de tamis :	4911.0	98.37	1.63
	$R_n=4904.0$		
Passant au dernier tamis utilisé $T_n=7.0g$	Observation : propreté superficielle : $\xi= 1.63\%$ Taux d'humidité : $w=0.15\%$		
$R_n + T_n=4911.0g$			
$100(M_{S1}- (R_n + T_n))/ M_{S1}=0.0$			

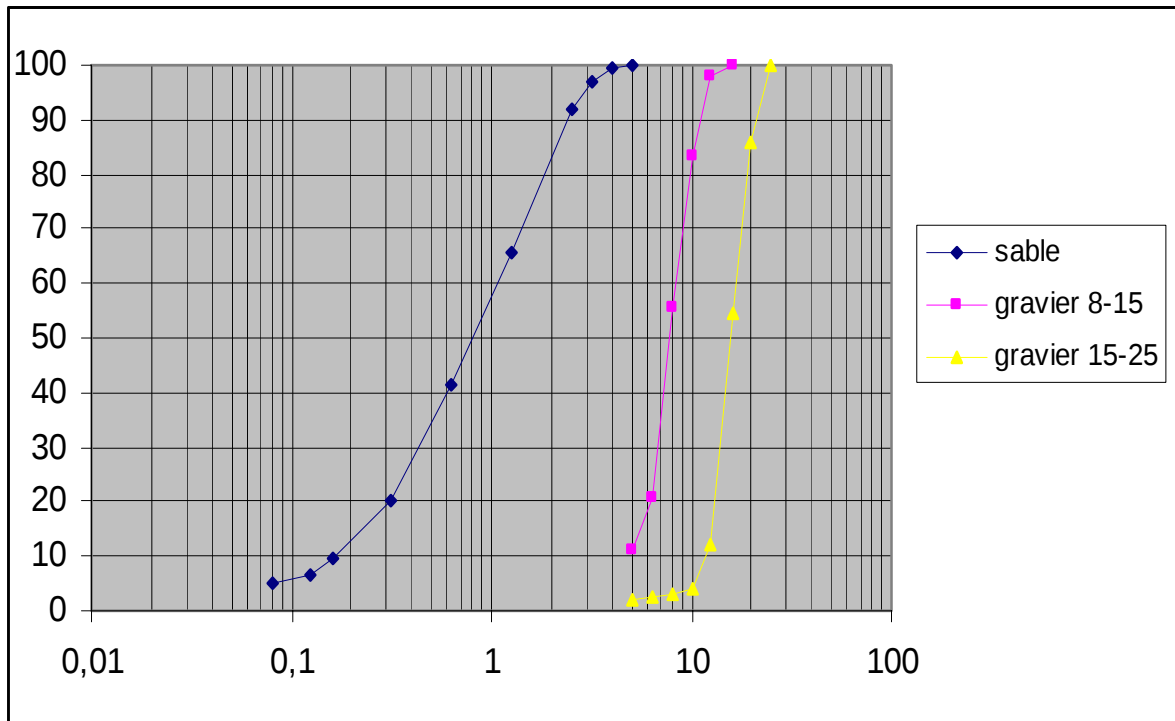


Figure.III.1. Analyse granulométrique des granulats. Selon NF P18.560

III.2.2.4. Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et

de 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 III-3 et III-4.

Tableau III-3. Mesure des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption de la teneur en eau

Echantillon	Masse volumique réelle (t/m^3)	Masse volumique imbibée (t/m^3)	Taux d'absorption (%)	Porosité (%)
Sable	2.58	2.62	1.55	-
Gravier 8/15	2.66	2.68	0.96	2.55
Gravier 15/25	2.67	2.69	0.61	1.64

Une composition minéralogique des granulats ‘sable et gravier’ est évaluée sur la base des résultats chimiques (tableau III-4 et III-5) et les diagrammes RX figure III-4.

D’après les analyses chimiques et minéralogiques le sable est plus un calcaire sableux argileux, par contre le gravier titre à 92 % en matière carbonatée .les sables roulés augmentent l’ouvrabilité du mélange granulaire ; les sables concassés améliorent les résistances mécaniques.

Tableau III-4. Analyse chimique de sable et du gravier.

Composition chimique	Teneur (%)	
	Sable	Gravier
Na ₂ O	0.54	0.10
MgO	0.97	1.32
Al ₂ O ₃	5.34	0.68
SiO ₂	44.14	4.65
SO ₃	0.12	0.45
K ₂ O	0.47	0.18
CaO	22.12	50.10
Fe ₂ O ₃	4.46	0.79

Tableau III-5. Analyse minéralogique de sable et du gravier.

Minéraux	Teneur (%)	
	Sable	Gravier
Quartz	37.5	4.00
Calcite	39.0	86.0
Dolomite	1.50	6.00
Feldspath.Na,Ca	4.50	-
Min .ferrugineux	4.50	1.00
Gypse	-	1.00
Kaolinite	6.00	-
Muscovite	4.00	-
Chlorite	3.00	-
Argile	-	2.00

III.2.3. résultats des essais physiques sur le ciment Rais Hamidou:

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé, issu de la cimenterie de RAIS HAMIDOU, avec une finesse de **3184 cm²/g** et d’une résistance de classe vraie de **40.21 MPa** Des essais physico- mécaniques, chimiques et minéralogiques sur ciment sont réalisé 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 III-6, III-7, III-8 et III-9.

Tableau III-6. Essais physiques sur
ciment.

		Résultats
Consistance normalisée	H ₂ O	23.20 %
Temps de prise	Début	155 mn
	Fin	190 mn
Stabilité	Froid	-
	Chaud	1.97 mm
Essai de retrait	03 jours	115.62 µm/m
	07 jours	225.00µm/m
	28 jours	381.25µm/m
Essai de gonflement	03 jours	37.50 µm/m
	07 jours	37.50 µm/m
	28 jours	75.00 µm/m
Masse volumique absolue du ciment		3.12g/cm ³
Finesse suivant la méthode Blaine		3184 cm ² /g

Tableau III-7. Essais mécaniques sur ciment.

Echéances en jours	Flexion	Compression
02 jours	4.28 MPa	18.38 MPa
07 Jours	6.13 MPa	32.20 MPa
28 Jours	7.03 MPa	40.21 MPa

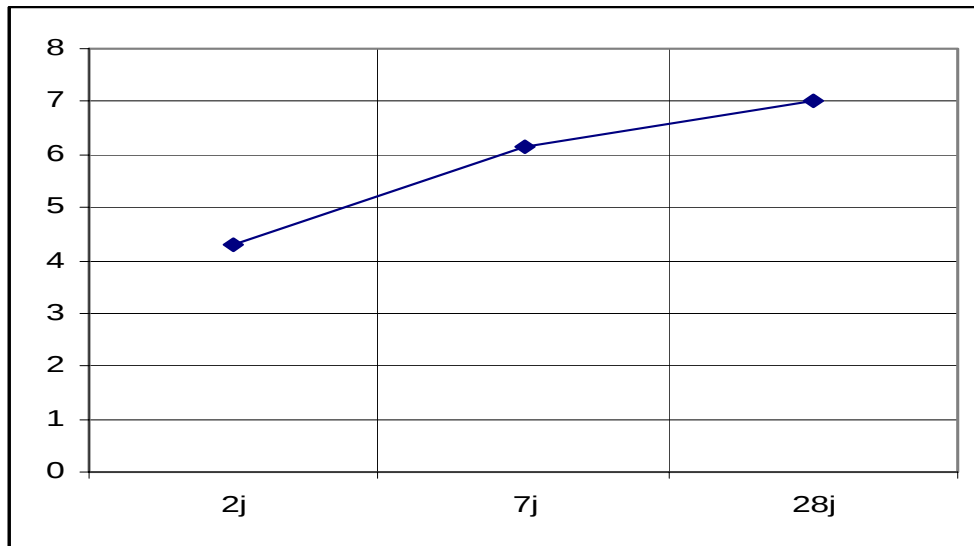


Figure III-2.Evolution de la résistance à la flexion du ciment

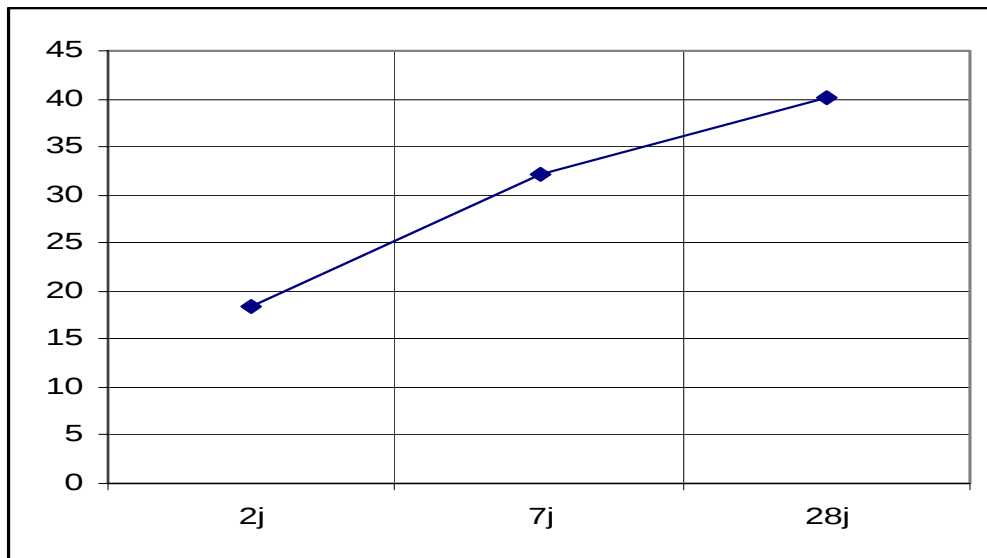


Figure III-3.Evolution de la résistance à la compression du ciment

Tableau III-8. Analyse chimique de ciment.

Composition Chimique	Teneur %
SiO₂	21.64
Al₂O₃	5.30
Fe₂O₃	3.04
CaO	62.19

MgO	1.08
K₂O	0.90
Na₂O	0.29
SO₃	2.77
CaO libre	2.37
Cl⁻	0.007
Ins.	2.76
P.F	2.49

Tableau III-9. Analyse minéralogique de ciment

Phase	Constituants minéraux du Clinker	<i>Teneur rapportée au Clinker (%)</i>
Clinker	C₃S	51
	C₂S	29
	C₃A	10
	C₄AF	08
	CaO.L	02
Régulateur de prise	Gypse	05
AJOUTS	Poussière de fumée	07

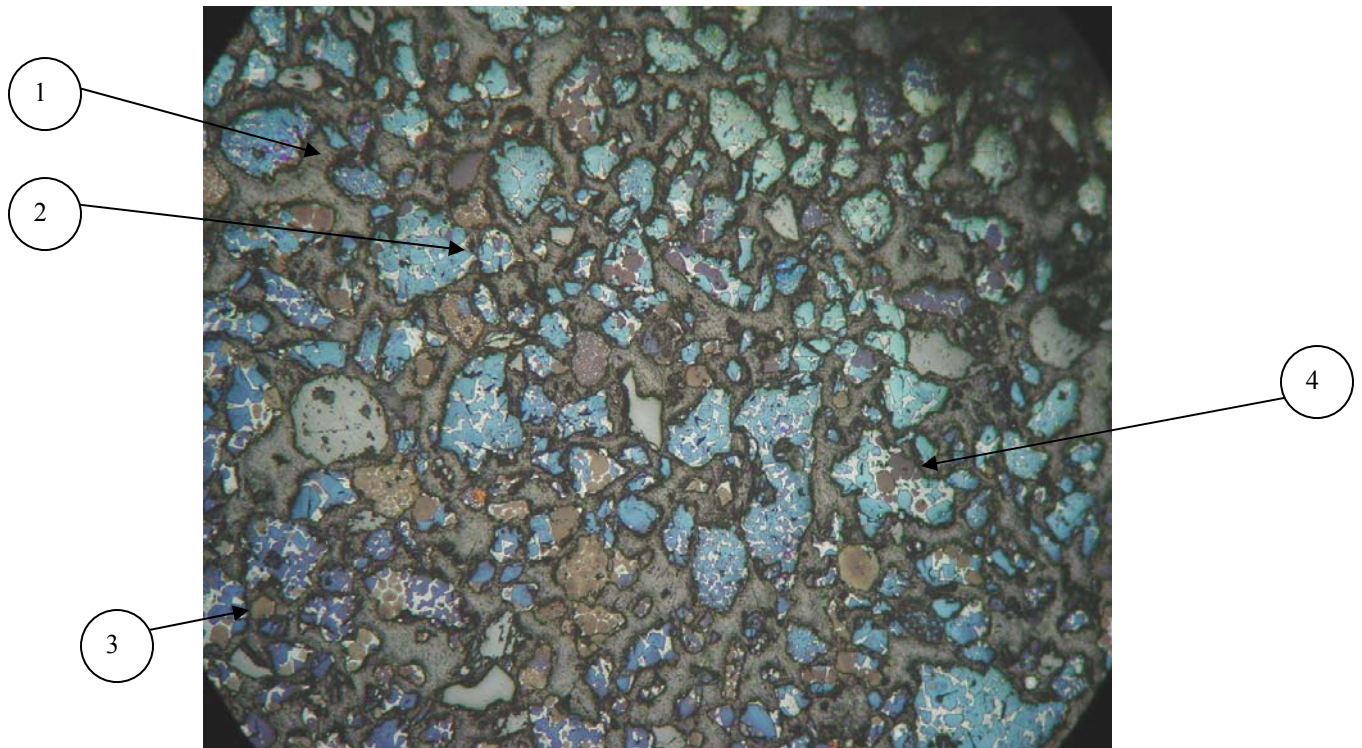


Figure III-4. Les constituants minéralogiques de clinker

1-Caol 2-C₃S 3-phase liquide 4-C₂S

III.3. COMPOSITION BETON

III.3.1. Formulation selon DREUX :

La formulation du béton est basée sur la méthode de DREUX GORISSE. Le pourcentage des différents granulats est déterminé à partir de la figure III. 1. Ce pourcentage est ensuite transformé en masse. La composition du béton témoin (gravier, sable et ciment) est la même que celle du béton armé de fibres. La composition pour 1m³ de béton est la suivante (tableau III.10) :

Tableau III.10-Composition de béton témoin

Composant	Volume (l/m ³)	Poids (kg/m ³)
Ciment	113	350
Sable	266.76	688
Eau	198	198
Granite 8/15	133.38	355
Granite 15/25	301.86	806
Total	1013	2397

OBSERVATIONS:

- la composition calculée est de densité théorique de 2.397t/m^3 , de cette composition ont été confectionnées trois (03) éprouvettes prismatiques de 14x14x56 pour la flexion et trois éprouvettes cylindriques 16x32 pour la compression.
- On a obtenu un mélange plastique avec un affaissement de 7.6 cm.
- Serrage par table vibrante.
- Conservation dans l'eau potable.
- Le rapport (eau/ciment) = 0.56.

La section d'armature de calcul « A_c » est remplacée dans les autres éprouvettes, par une combinaison de la section minimale « $A_{\min}$ » et un pourcentage de fibres métalliques variant de 30%, 60% et 100% de la différence des sections « A_c » et « $A_{\min}$ ». les fibres métalliques seront introduites seulement dans la zone tendue des éprouvettes prismatiques, d'une manière aléatoire (répartition aléatoire). Le poids des fibres incorporées est donné dans le tableau III.11.

Tableau III.11-Poids des fibres incorporées dans une éprouvette prismatique « 14x14x56 »

% de la fibre	30%	60%	100%
Poids (g)	141.68	283.36	472.66

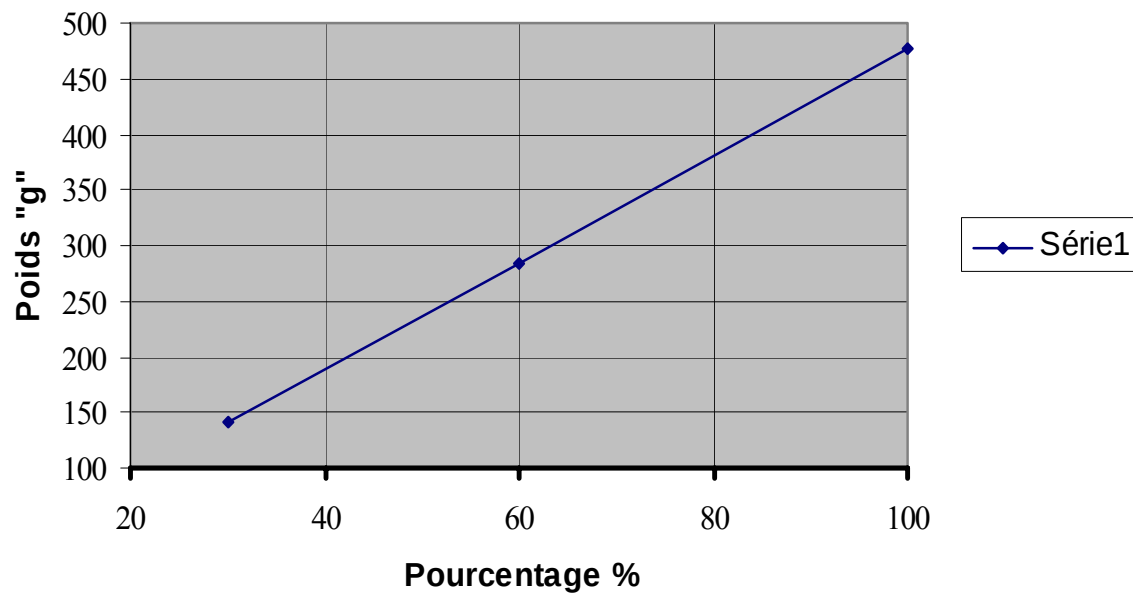


Figure III-5. Variation du poids des fibres en fonction de leur pourcentage

III.3.2. Provenance des fibres utilisées

Les fibres utilisées sont locales et proviennent de la récupération .Elles sont issues des déchets de câbles de freinages, accélérateurs des vélos et des motocyclistes .Elles ont une forme géométrique droite (voir figure III-6) .Leurs caractéristiques géométriques et physiques sont données au tableau III.12.

Tableau III.12- Caractéristiques des fibres.

Fibres métalliques	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance (MPa)
	40-50	1- 2	0.35-0.65	4 -5	1100



Figure III.6- Type de fibres métalliques utilisées

III.3.3. Fabrication et mise en œuvre

III.3.3.1. Problématique

Les règles édictées par les normes ne donnent aucune information relative au malaxage des bétons de fibres métalliques (BFM). Pour la fabrication de ce type de béton, deux conditions indispensables sont à prendre en général, en considération :

- Premièrement, le malaxage du composite doit conduire à une bonne rhéologie pour rendre possible sa mise en œuvre. Se pose alors le problème de l'homogénéisation de la masse composite (formation d'oursins ou de pelotes). L'éclatement recommandé dans les nombreux travaux est de l'ordre $L/D = 100$.
- Deuxièmement, un « bon matériau » nécessite une « bonne mise en œuvre ». Ce point est encore plus critique avec les BFM, puisque leurs caractéristiques mécaniques sont fortement dépendantes de la distribution et de l'orientation des fibres vis-à-vis de la direction des sollicitations principales, elles mêmes induites par l'écoulement du matériau dans le moule.

III.3.3.2. Procédure de malaxage

III.3.3.2.1. 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 III.7).



Figure III.7 .Malaxeur à axe vertical : Malaxage du béton témoin

III.3.3.2.2. 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 de fibres ; 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. (figure III.8).



A B
Figure III.8. Introduction de fibres au cours de malaxage
A-30% de fibres B-100% de fibres

III.3.3.2.3. Procédure de préparation des éprouvettes et de mise en œuvre

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 correspondantes, chacune au tiers (1/3) du volume de la zone tendue de l'élément considéré. 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 III.9)



Figure III.9. Etapes de préparation des éprouvettes
 A : remplissage de béton armé de fibres
 B : table de vibration
 C : phase finale de remplissage des 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). L'indexation des éprouvettes est donnée au tableau III.13.

Tableau III.13. Indexation des éprouvettes.

BTC	BTF	BTA12	BTA06	BTAF0630	BTAF0660	BTAF06100
Béton témoin sans fibre pour compression	Béton témoin sans fibre pour flexion	Béton armé de 02 T 12	Béton armé de 02 T 06	Béton armé de 02 T 06 avec 30% de fibres	Béton armé de 02 T 06 avec 60% de fibres	Béton armé de 02 T 06 avec 100% de fibres

III.4. Différentes mesures

III.4.1. Mesure de l'ouvrabilité

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 III.14), nous constatons que celui-ci diminue lorsque le pourcentage des fibres augmente (figure III.10.).

Tableau III.14. Affaissement au cône d'Abrams.

Type de béton	Affaissement (cm)
BTC	7.6
BTF	7.6
BTA12	7.6
BTA06	7.6
BTAF0630	6.7
BTAF0660	5.3
BTAF06100	3.5

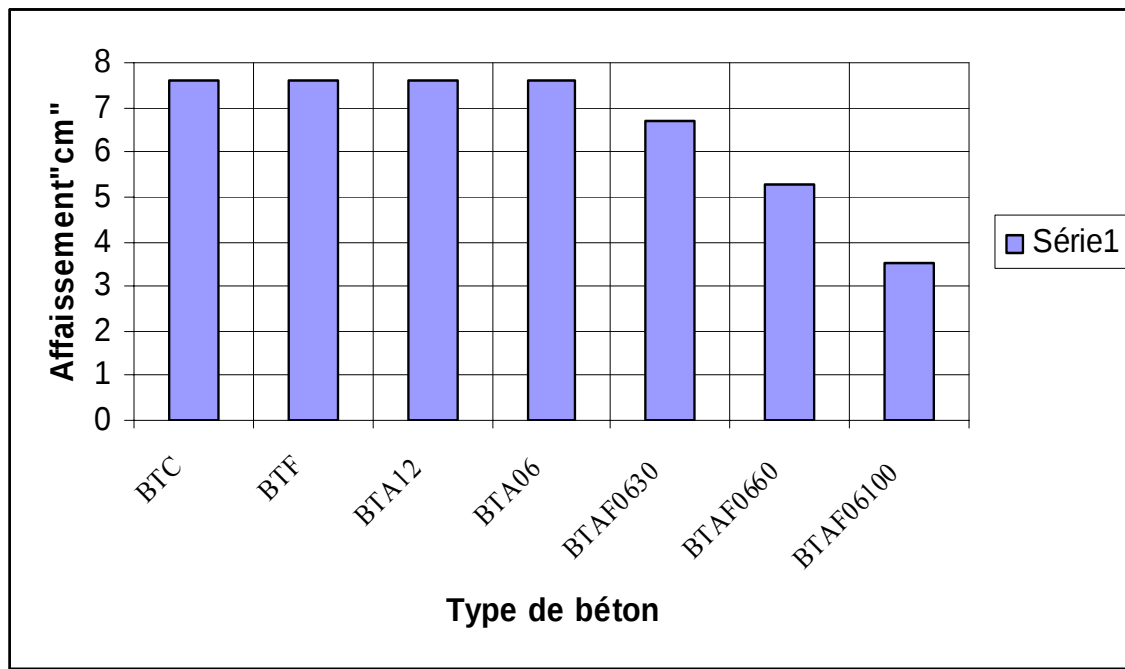


Figure III-9. Affaissement en fonction du type de béton

Nous avons obtenu un béton plastique avec 60%de fibres, mais un béton ferme avec un pourcentage de 100% de fibres, par contre un béton plastique dans les autres cas,avec la même formulation en proportion massique eau /ciment= 0.56.



A



B

Figure III.10- Affaissement du béton

A : béton sans fibre

B : béton avec 100% de fibres

III.4.2. Comportements différés

Les résultats présentés ici, sont à titre informatif et constituent le point de départ d'une campagne expérimentale plus importante qui sera développée par la suite dans cette étude.

III.4.2.1. Quantification du retrait sur mortier

Le retrait du béton à matrice cimentaire est essentiellement endogène, puisque le matériau est majoritairement composé de pâte. Le retrait de dessiccation est quasiment nul et la finesse des pores induit de fortes pressions capillaires. Le retrait thermique, dû à la contraction du béton ou du mortier lors de son refroidissement, est prépondérant pour les pièces massives.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- la nature du ciment
- la finesse de mouture
- le dosage en ciment dans le béton

Pour évaluer le retrait ; nous avons confectionné des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm, remplis de mortier fibré de 60% et 100% de fibres métalliques. Les éprouvettes ont été conservés à l'air libre à une température de 20° C et une hygrométrie de 50% .

On présente les résultats dans le tableau III.15 et figure III.11 les deux essais relatifs au mortier sans fibres et avec fibres.

Tableau III.15. Retrait du mortier sans et avec fibres

Type de mortier	Retrait (µm/m)	
	07 j	28j
Mortier sans fibres	225.00	381.25
Mortier avec 60% de fibres	212.50	306.25
Mortier avec 100% de fibres	120.00	210.00

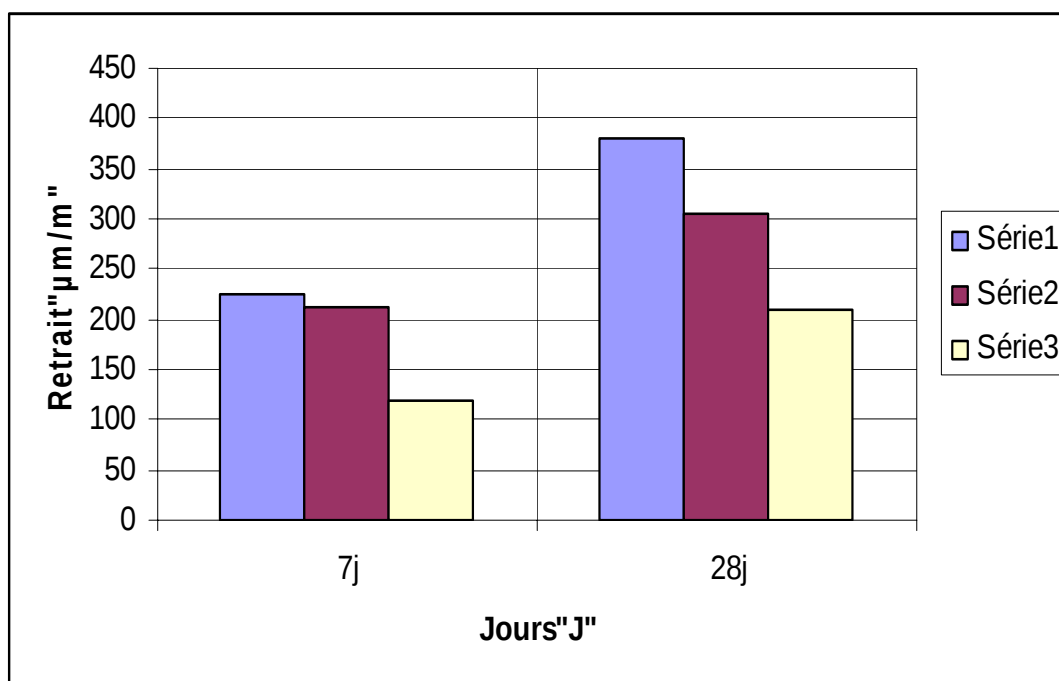


Figure III.11- Variation du retrait à 7 j et 28 j
 Série 1 : Mortier sans fibres
 Série 2: Mortier avec 60% de fibres
 Série 3 : Mortier avec 100% de fibres

III.4.3. Evolution de la résistance sur mortier

Dans le tableau III.16 et les figures III.12 et III.13, on présente la variation des résistances en compression et en flexion sur mortier sans fibres et avec fibres.

Des éprouvettes de 4x4x16 cm sont remplis de mortier fibré de 60% et de 100% de fibres, conservés dans une enceinte climatique à une température de 20°C et une humidité de 95%. Des essais de compression et de flexion trois points ont été effectués à 07 jours et à 28 jours. Les essais ont été réalisés par un presse TONI TECKNIC étalonnée, à une vitesse constante, les fibres sont disposées aléatoirement.

Tableau III.16. Variation des résistances du mortier avec fibres et sans fibres

Echéances en jours	Mortier sans fibres		Mortier avec 60% de fibres		Mortier avec 100% de fibres	
	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
07 j	6.13	32.20	12.93	31.59	14.15	34.43

28j	7.03	40.21	13.09	38.25	16.02	41.25
------------	------	-------	-------	-------	-------	-------

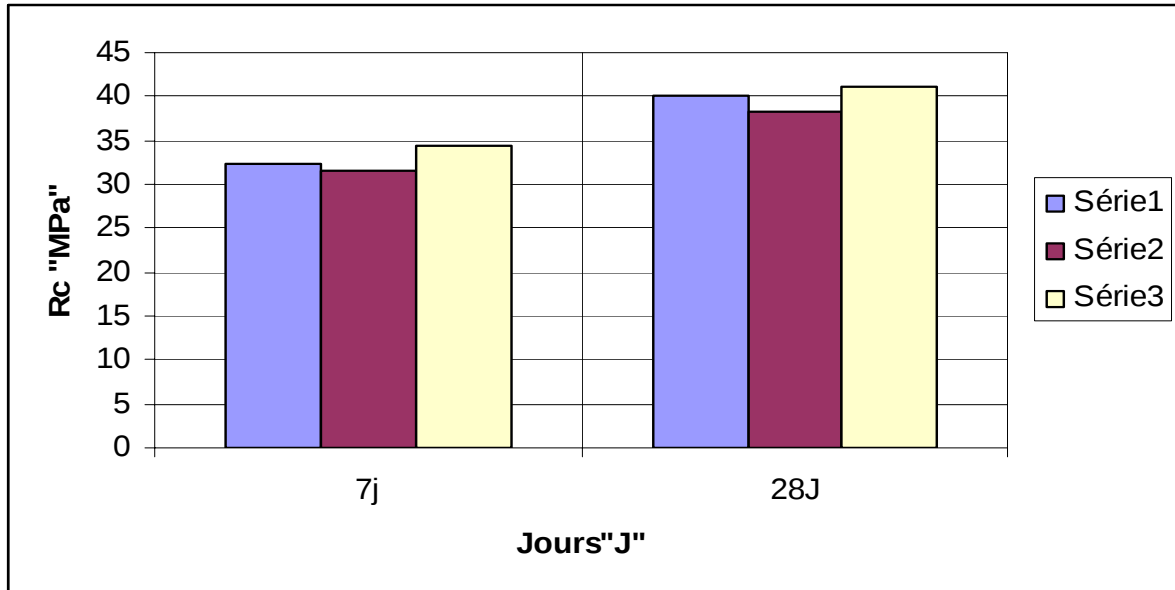


Figure III.12- Variation de la résistance du mortier en compression à 7 j et 28 j

Série 1 : Mortier sans fibres

Série 2: Mortier avec 60% de fibres

Série 3 : Mortier avec 100% de fibres

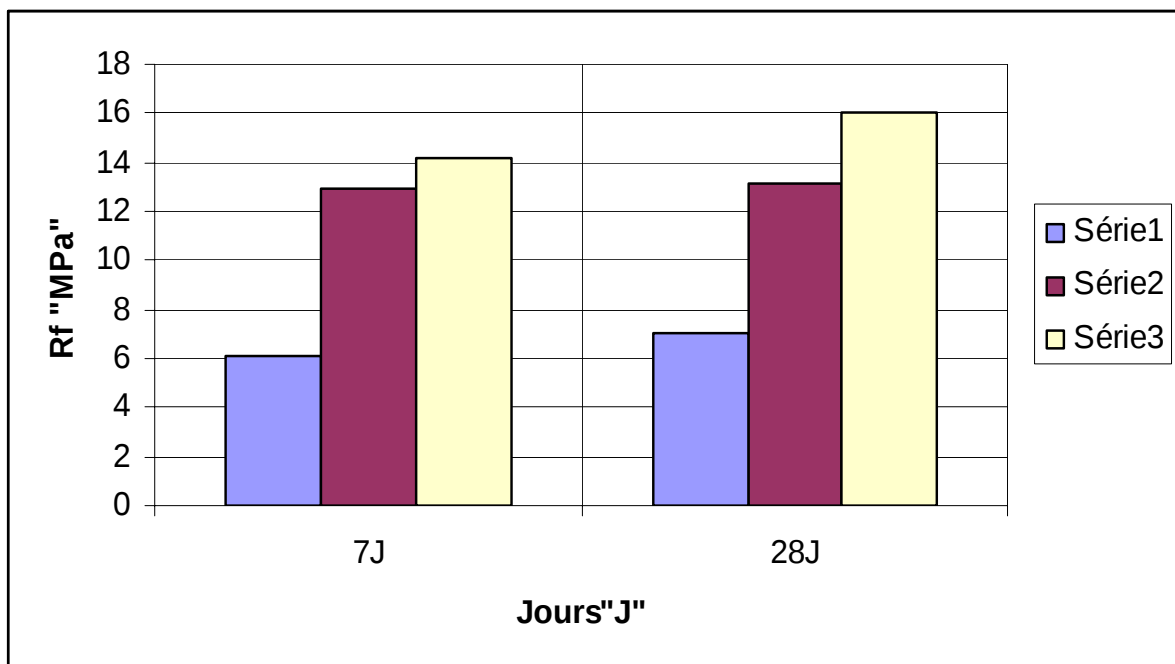


Figure III.13- Variation de la résistance du mortier à la flexion à 7 j et 28 j

Série 1 : Mortier sans fibres

Série 2: Mortier avec 60% de fibres

Série 3 : Mortier avec 100% de fibres

Conclusion du chapitre

L'identification physico – chimique des constituants a permis de déterminer les propriétés intrinsèques à savoir : la distribution granulaire, l'équivalent du sable, le retrait ; la nature des fibres, les résistances du mortier selon la composition, etc.

L'analyse des résultats des essais en compression et en traction par flexion du mortier a permis de mettre en exergue les performances et l'influence de ces types de fibres issues de la récupération des câbles de freins des vélos et motocycles, dans l'amélioration des performances, ce qui est de bonne augure quant au comportement mécanique des éléments soumis à une flexion simple.

Chapitre IV

Essais Mécaniques Et Analyse Des Résultats

Chapitre IV. ESSAIS MECANQUES ET ANALYSE DES RESULTATS

IV.1. Introduction

La caractérisation du comportement mécanique a été effectuée par approche expérimentale au niveau du laboratoire LMMC de Boumerdes et au niveau du CETIM-Boumerdes.

IV.2. Essais mécaniques

IV.2.1. Essai de résistance à la traction par flexion [NF P18-407]

L'essai est réalisé en considérant des éprouvettes prismatiques 14X14X56cm de section transversale carrée jusqu'à la rupture. 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 4 appuis simples. La machine d'essai est une presse hydraulique TONI TECHNIK de capacité maximale 100KN, équipée de même unité de mesure que celle de compression, reliée à une chaîne électronique permettant d'afficher de manière digitale la charge de rupture appliquée à l'éprouvette d'essai.

IV.2.2. Essai de résistance à la compression [NF P18-406]

L'essai consiste à écraser par compression uni axiale des éprouvettes cylindriques 16*32cm entre les plateaux de la presse hydraulique MFL SYSTEM avec une étendue de mesure de 3000 KN. Son plateau supérieur est mobile de telle sorte à épouser la surface de l'éprouvette; 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; on peut utiliser des feuilles de carton de 2mm d'épaisseur qui s'écrasent sous la pression en amortissant les défauts superficiels. Le plateau supérieur est monté sur une rotule lui permettant un ajustement parfait sur la face supérieure de l'éprouvette. 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 IV.2).

La dispersion trouvée sur éprouvette est pratiquement inévitable, il faut la réduire le plus possible par un contrôle efficace. La résistance caractéristique est une valeur statistique qui doit présenter d'après les critères de conformité adoptés en contrôle, une

bonne probabilité d'être satisfaite en ne présentant qu'un risque faible et admis (10 ou 5%) de valeurs inférieures ; elle est ainsi définie par : $\sigma_{ck} = \sigma_c - k_1 \cdot S$

Avec : σ_c : résistance moyenne

S : écart type

k_1 : coefficient qui dépend de l'ordre du risque admis ($k_1=1.65$ pour un risque de 5%)

IV. 2.3. Compositions granulaires

Les différentes compositions granulaires sont données dans les tableaux ci-dessous. (Tableau IV.1. Et IV.2)

Tableau IV.1. Composition de béton ferrailé avec des barres de T6.

Composant	Volume (l/m ³)	Poids (kg/m ³)
Ciment	113	350
Sable	266.76	688
Eau	198	198
Granite 8/15	133.38	355
Granite 15/25	301.86	806
Total	1013	2397

Tableau. IV.2. Composition de béton ferrailé avec des barres de T12 .

Composant	Volume (l/m ³)	Poids (kg/m ³)
Ciment	113	350
Sable	266.76	688
Eau	198	198
Granite 8/15	133.38	355
Granite 15/25	301.86	806
Total	1013	2397

OBSERVATIONS :

- La composition calculée est de densité théorique de 2,397. De cette composition, ont été confectionnés trois (03) éprouvettes prismatiques de 14x14x56 pour les essais de flexion.
- On a obtenu un mélange plastique avec un affaissement de 7,6 cm.

- Serrage par table vibrante.
- Conservation dans l'eau potable.
- Le rapport E / C (eau/ciment) = 0.56.

IV.3. Essais de compression.

IV.3.1. Mode opératoire.

La résistance en compression du béton sans fibres et avec fibres est mesurée à partir de la moyenne de trois éprouvettes cylindrique 16 x32 cm. Ces éprouvettes ont été confectionnées avec la formulation donnée précédemment. Elles sont coulées dans des moules en acier et vibrées pendant leur remplissage (figure IV.1).



Figure IV.1. Remplissage et vibration des moules

Après démoulage à 24 h, elles sont conservées dans des bacs remplis d'eau à une température de 20°C .Ils sont soumises à l'essai ,28 jours après le coulage ,et rectifiées par surfacage des deux faces selon la norme NF P18.416.



A

B

Figure IV.2 . (A) - Machine de compression ; (B) - Ajustement de l'éprouvette

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. En exploitant les résultats, les diagrammes contraintes - déformations sont tracées et ce, pour chaque pourcentage en fibres.

IV.3.2. Résultats des essais de compression

Les résultats des essais de compression simple du béton témoin (sans fibres) et du béton armé de fibres, sont donnés dans les tableaux, IV.3 IV.4, IV.5 et IV.6.

Tableau IV.3 Résultats des essais de compression 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)
BTC	16x32	28	15.288	2.388	620	200,96	30.85
	16x32	28	15.249	2.382	630	200,96	31.35
	16x32	28	15.310	2.392	645	200,96	32.09

Tableau IV.4. Résultats des essais de compression béton témoin avec 60%de fibres

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)
BTC 60%	16x32	28	15.250	2.382	492	200,96	24.48
	16x32	28	15.115	2.361	476	200,96	23.68
	16x32	28	15.200	2.375	482	200,96	23.98

Tableau IV.5. Résultats des essais de compression béton témoin avec 100% de fibres.

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)
BTC 100%	16x32	28	15.454	2.410	482	200,96	23.98
	16x32	28	15.120	2.362	445	200,96	22.14
	16x32	28	15.230	2.379	472	200,96	23.49



A-



B-



C-

Figure IV.3. Les étapes pour le calcul de déplacement

A : Collage de la jauge

B : La chaîne d'enregistrement déplacement

C : Eprouvette après rupture

Le tableau IV..6 donne les résultats des déplacements longitudinaux en fonction des efforts appliqués pour chaque type de béton.

Tableau IV.6. Résultats effort - déplacement longitudinal des différents types de bétons

Force (KN)	Type de béton		
	BTC	BTC60	BTC100
	Flèche (mm)		
10	$3.20.10^{-5}$	1.10^{-5}	$2.9.10^{-5}$
20	$7.40.10^{-5}$	2.10^{-5}	$6.9.10^{-5}$
30	$9.40.10^{-5}$	$6.8.10^{-5}$	$9.4.10^{-5}$
40	$1.20.10^{-4}$	$8.9.10^{-5}$	$1.16.10^{-4}$
50	$1.43.10^{-4}$	$1.08.10^{-4}$	$1.39.10^{-4}$
100	$2.38.10^{-4}$	$2.06.10^{-4}$	$2.60.10^{-4}$
150	$3.25.10^{-4}$	$2.99.10^{-4}$	$3.47.10^{-4}$
200	$4.06.10^{-4}$	$3.86.10^{-4}$	$4.86.10^{-4}$
250	$4.84.10^{-4}$	$4.82.10^{-4}$	$6.09.10^{-4}$

300	$1.28. 10^{-4}$	$5.87. 10^{-4}$	$7.51. 10^{-4}$
350	$6.49. 10^{-4}$	$7.28. 10^{-4}$	$9.08. 10^{-4}$
400	$7.18. 10^{-4}$	$9.04. 10^{-4}$	$1.15. 10^{-3}$
450	$1.34. 10^{-3}$	$1.16. 10^{-3}$	$1.79. 10^{-3}$
500	$1.23. 10^{-3}$	$2.44. 10^{-3}=492\text{KN}$	$2.50. 10^{-3}=482\text{KN}$
600	$1.06. 10^{-3}$	-	-
640	$1.15. 10^{-3}$	-	-

Les valeurs du tableau IV.7 et les figures IV.4, IV.5, IV.6, et IV.7 montrent l'influence du pourcentage en fibres sur le comportement des éprouvettes soumises à la compression .L'amélioration est clairement mise en évidence.

Tableau IV.7-Eléments de comparaison pour les différents types de bétons.

Type de béton	Contrainte (MPa)	Déplacement longitudinal (mm)
BTC	31.43	$1.15. 10^{-3}$
BTC60%	24.05	$2.44. 10^{-3}$
BTC100%	23.20	$2.50. 10^{-3}$

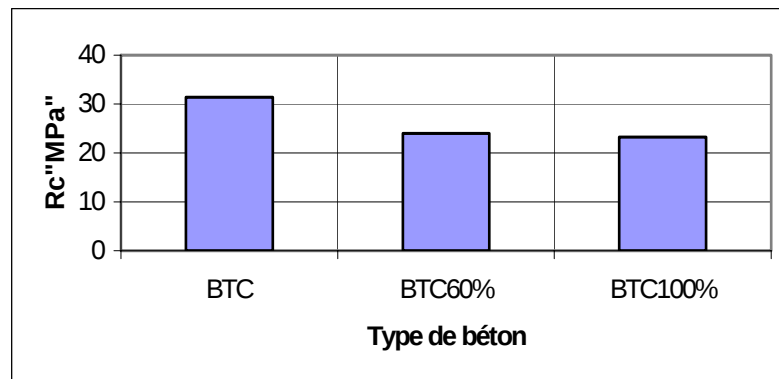


Figure IV.4. Variations des résistances à la compression selon la composition

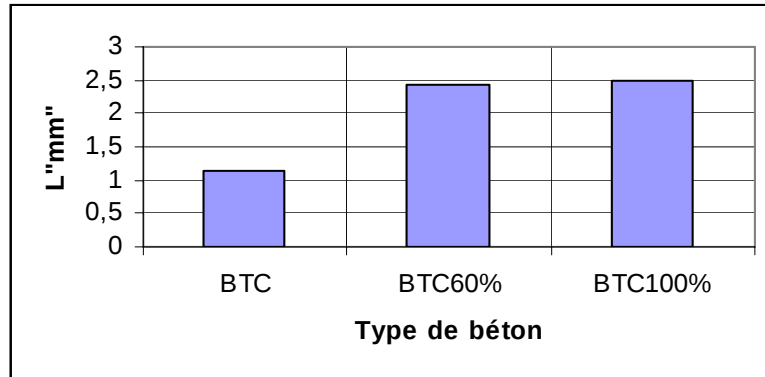


Figure IV.5. Les Variations des déplacements longitudinaux selon la composition

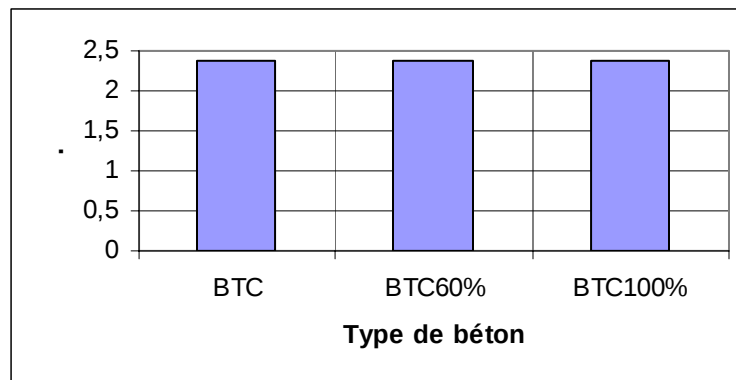


Figure IV.6. Les Variations des masses volumiques selon la composition

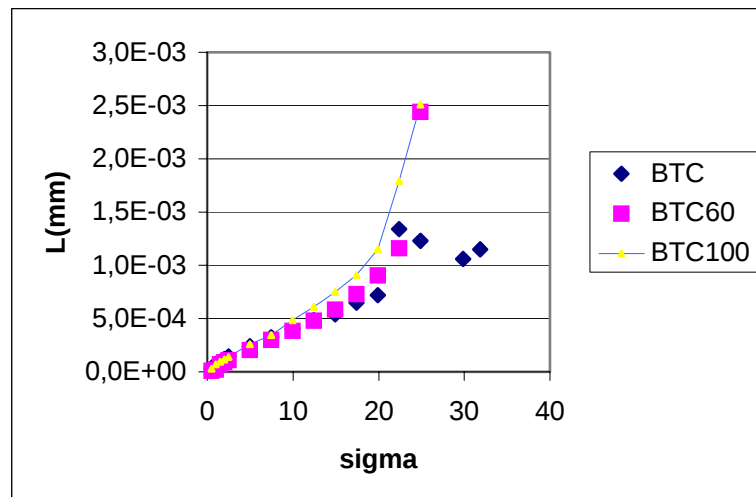


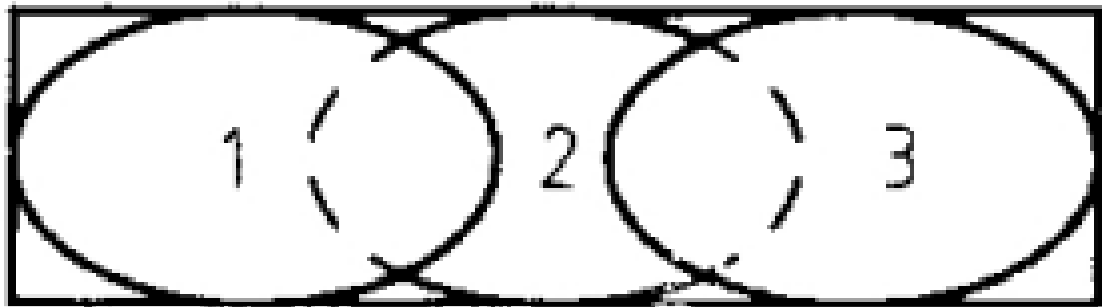
Figure IV.7. Variation du déplacement longitudinal en fonction de la contrainte selon la composition

En augmentant le pourcentage des fibres, nous constatons une petite chute des résistances. Ceci peut s'expliquer par la faible compacité, car les fibres jouent le rôle de gros granulats. Pour augmenter d'une manière significative les résistances en compression des BAF, il faudra une autre composition des différents granulats. Cela consiste à augmenter le pourcentage d'éléments fins : la méthode la mieux adoptée est celle de Baron-Lesage. Lors de l'optimisation en fibres, en plus de leur longueur.

IV.4.Essai de traction par flexion

Les comportements uniaxiaux ayant été présentés précédemment, une deuxième étape qui consiste à caractériser des éléments de structures (poutres) a été effectuée. L'essai est mené en flexion quatre points conformément à la norme NF P18.407. L'essai de flexion est réalisé selon la norme NF P18.409. Les corps d'épreuves sont des éprouvettes prismatiques de dimensions 14x14x56 cm (arête x hauteur x longueur) sont soumis à l'essai, 28 jours après le coulage.

Les éprouvettes ont les mêmes dimensions pour le cas d'un béton ordinaire ou pour un béton avec fibres mais différentes par leur procédé de mise en œuvre. Le béton avec fibres est introduit en trois tas dans le moule, selon la figure IV.8 à l'aide d'une pelle à coque cylindrique, par contre pour le béton sans fibres, il est introduit dans le moule en deux couches égales à la moitié de volume total chacune. La vibration utilisée est la table vibrante.



A-



B-



C-

Figure IV.8-Remplissage des moules et vibration

A – B : cas d'un béton avec fibres.

C : vibration des moules.

Les essais sont réalisés par une presse TONI TECHNIK étalonné de 60KN et une autre presse TONI TECHNIK de 100KN ,les éprouvettes reposent sur deux appuis distants de 42 cm et sont soumises à une charge verticale, appliquée au milieu de la travée centrale .Le dispositif de chargement et machine d'essai sont donnés à la figure IV.9 et IV.10.La charge est appliquée progressivement à vitesse de chargement contrôlée

et ce ,jusqu'à la rupture pour chaque type de béton avec capture de déplacement qui permet de suivre la flèche à mi-portée de l'éprouvette.

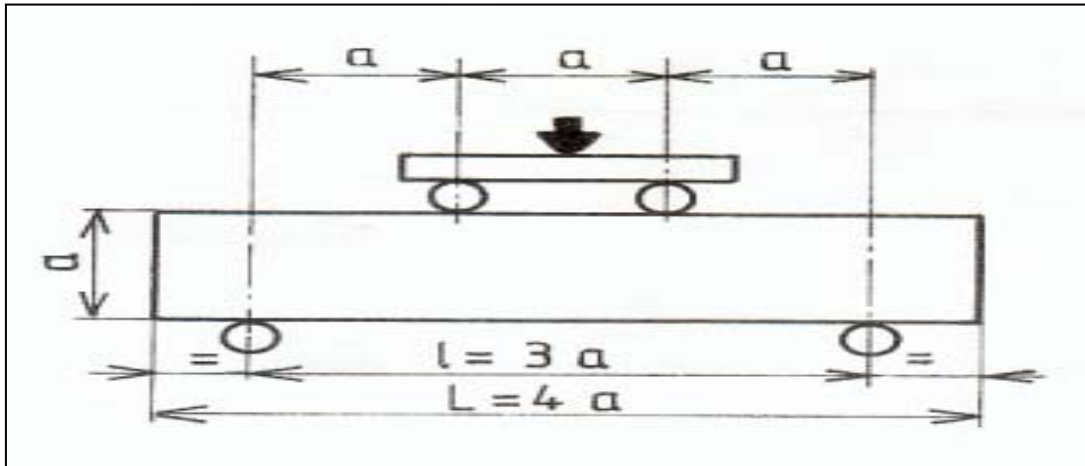
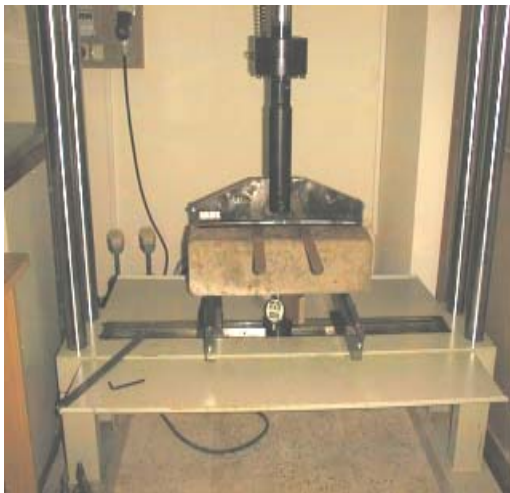
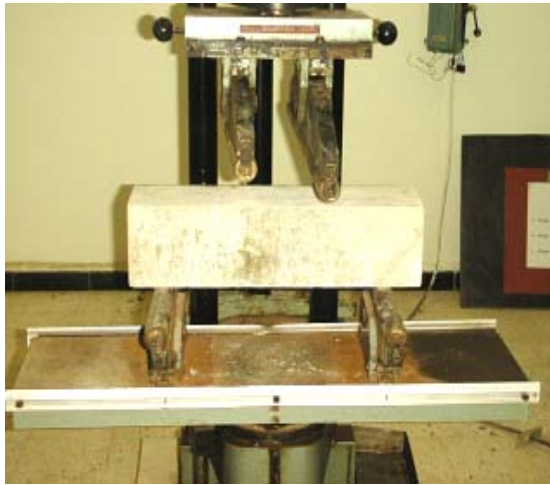


Figure IV.9. .Dispositif de chargement

a : arête =14 cm, $I= 3201.33 \text{ cm}^4$

L : longueur de l'éprouvette =56 cm

l :distance entre appui = 42 cm



A-

B-

Figure IV.10. Machine d'essai de flexion 4 points

A : mode de chargement ; presse de 60kN

B : presse de 100kN avec capteur de flèche

Pour le cas de béton armé, la zone tendue été ferrailée par deux barres en T12 et la zone comprimée par deux barres T8 voir figure IV.11, ensuite le ferrailage de la zone tendue a été remplacé par un ferrailage minimum de deux barres T6 et un pourcentage de fibres d'acier, en gardant le même ferrailage de la zone comprimée.

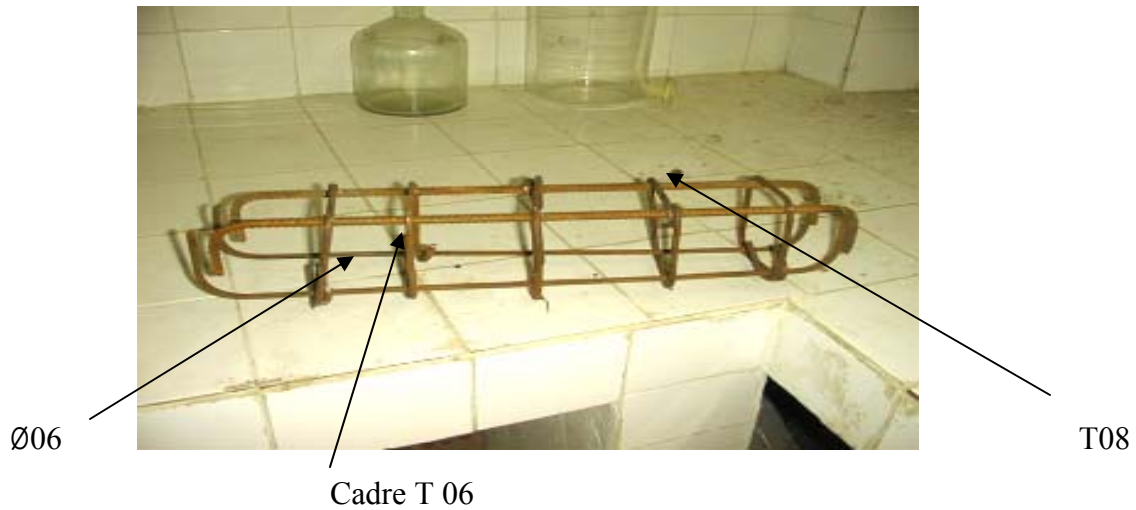


Figure IV.11-Exemple de ferrailage des éprouvettes

L'allure des courbes obtenues, lors de l'essai de traction par flexion des éprouvettes est

donnée à la figure IV.12.

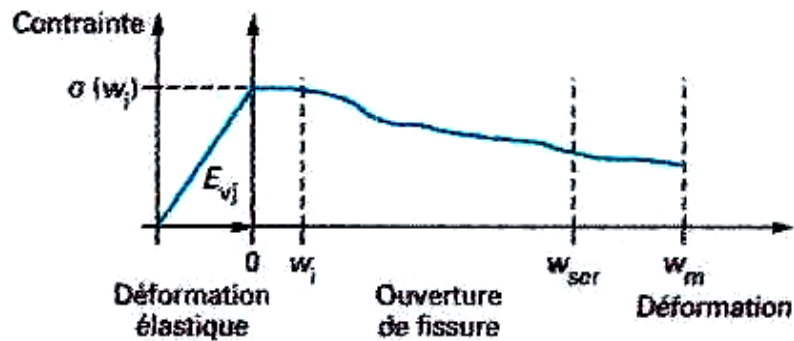


Figure IV.12.Allure des courbes charge- flèche.

La courbe comporte une première phase, élastique linéaire jusqu'à atteinte de l'effort

maximal correspondant à l'apparition de la première fissure .Cet effort maximal est fonction

du pourcentage en fibres.

La deuxième phase est caractérisée par une branche descendante plus au moins ductile. A ce stade, les fibres sont sollicitées en traction .Elles interviennent en « cousant » les

fissures et en limitant leurs ouvertures .La longueur des fibres ainsi que le pourcentage deviennent des paramètres importants. En effet, l’effort nécessaire à l’arrachement des fibres est fonction de la longueur adhérente et du système d’ancrage .En ce qui concerne le pourcentage, plus celui-ci est important plus le nombre de fibres cousant la fissure est important .

En fin, dans la troisième phase, la courbe tend à s’aplatir et ne s’annule qu’après une grande déformation. Il y a une redistribution des efforts due à l’existence des fibres au niveau de la fissure .Cet effort qui permet au matériau de résister encore est appelé effort résiduel .la rupture est obtenue soit par arrachement soit par rupture des fibres.

L’allure des courbes obtenues, lors de l’essai de traction par flexion des éprouvettes est donnée à la figure IV.14 , IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20 .Les valeurs caractéristiques, mesurées lors de ces essais sont données dans les tableaux IV.8-IV.9-IV.10-IV.11 IV.12. et IV.13

Tableau IV.8..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 ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTF	14x14x56	28	26.815	2.370	26.65	196	4.07
	14x14x56	28	26.187	2.314	24.32	196	3.72
	14x14x56	28	26.413	2.334	25.44	196	3.89

Tableau IV.9..Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T12

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTA12	14x14x56	28	28.047	2.479	110.50	196	16.91
	14x14x56	28	27.998	2.475	109.00	196	16.68

	14x14x56	28	28.241	2.494	111.25	196	17.02
--	----------	----	--------	-------	--------	-----	-------

Tableau IV.10..Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTA06	14x14x56	28	27.197	2.404	35.70	196	5.46
	14x14x56	28	27.528	2.433	32.70	196	5.00
	14x14x56	28	27.530	2.433	39.76	196	6.08

Tableau IV.11..Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 30% de fibres

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTAF0630	14x14x56	28	27.137	2.397	62.20	196	9.52
	14x14x56	28	26.649	2.356	63.50	196	9.72
	14x14x56	28	26.549	2.347	63.00	196	9.64

Tableau IV.12..Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 60% de fibres

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTAF0660	14x14x56	28	26.588	2.350	63.37	196	9.70
	14x14x56	28	27.175	2.402	65.10	196	9.96
	14x14x56	28	26.655	2.356	64.17	196	9.82

Tableau IV.13.Essai de flexion à 04 points sur béton armé de T6 avec 100% de fibres

Type de béton	Format (cm)	Age (j)	masse de l'éprouvette (Kg)	Masse volumique (g/cm ³)	Résistance en flexion simple		
					Force (KN)	Section (Cm ²)	Contrainte (MPa)
BTAF06100	14x14x56	28	27.122	2.397	63.67	196	9.74
	14x14x56	28	27.297	2.410	66.80	196	10.22
	14x14x56	28	27.320	2.415	67.66	196	10.35

Le tableau IV.14 donne les relevés effort – flèche des différents types de béton. La figureIV.13 Présente les courbes de variation effort - déplacement, obtenues lors des essais de flexion et montre également, l'influence du pourcentage de fibres sur le comportement des éprouvettes soumises à la traction par flexion.

On observe une première phase de comportement quasi –linéaire qui se termine à l'ouverture de la première fissure, l'éprouvette alors continue après à se déformer avec l'apparition de macro fissures .Il existe après l'ouverture de la première fissure une valeur maximale de l'effort que nous appellerons dans la suite effort maximal post fissuration voir figure IV.12. Nous avons à chaque essai ; relevé l'effort correspondant à l'apparition de la première fissure et à la rupture totale de l'éprouvette.

Tableau IV.14.. Résultats effort- flèche des différents types de bétons

	Type de béton				
	BTA12	BTA06	BTAF0630	BTAF0660	BTAF06100
Force (KN)	Flèche (mm)				
3	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
4	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
5	0.01	0.01	0.13	0.02	0.02
10	0.03	0.02	0.165	0.05	0.04
15	0.05	0.025	0.22	0.11	0.08
20	0.10	0.03	0.28	0.23	0.16
25	0.13	0.05	0.39	0.35	0.255
30	0.17	0.08	0.525	0.49	0.365
35	0.21	2.08	0.635	0.65	0.46
40	0.29	4.50=39.88KN	0.895	1.03	0.59
45	0.32	-	1.295	1.48	0.75
50	0.35	-	2.04	2.29	1.00
55	0.38	-	2.705	2.94	1.37
60	0.44	-	3.705	2.96	1.82
65	0.48	-	5.325=62.90KN	3.01=64.21KN	1..95
70	0.53	-	-	-	2.335=66.04KN
75	0.59	-	-	-	-
80	0.71	-	-	-	-
85	0.80	-	-	-	-
90	0.88	-	-	-	-
95	0.96	-	-	-	-
100	1.05	-	-	-	-
110.25	2.15	-	-	-	-

Le tableau IV.15. Ci-dessous, donne l'allure de l'effort en fonction du différent déplacement avec :

- P_{max} : charge maximale,
- P_r : effort résiduel après fissuration,
- f_{max} : flèche à la première fissuration ,
- f_u : flèche correspondante au début du palier de ductilité,
- f_r : flèche à la rupture .

Les différentes figures IV.14, IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19 et IV.20 , IV.21, IV.22 et IV.23, montrent les variations des résistances et performances mécaniques des éléments fléchis selon la composition.

Tableau .IV. 15. force de rupture et flèche correspondante pour chaque type de béton

Type de béton	P engendrant la 1 ^{ère} fissure (KN)	P rupture (KN)	Flèche - 1 ^{ère} fissure f_r (mm)	Flèche à la rupture f_r (mm)
BTF	12.50	-	-	-
BTA12	29.00		0.170	2.15
BTA06		39.88	-	4.50
BTAF0630	27.00	62.90	1.410	5.32
BTAF0660	21.58	64.21	0.260	3.01
BTAF06100	19.00	66.04	0.145	2.33

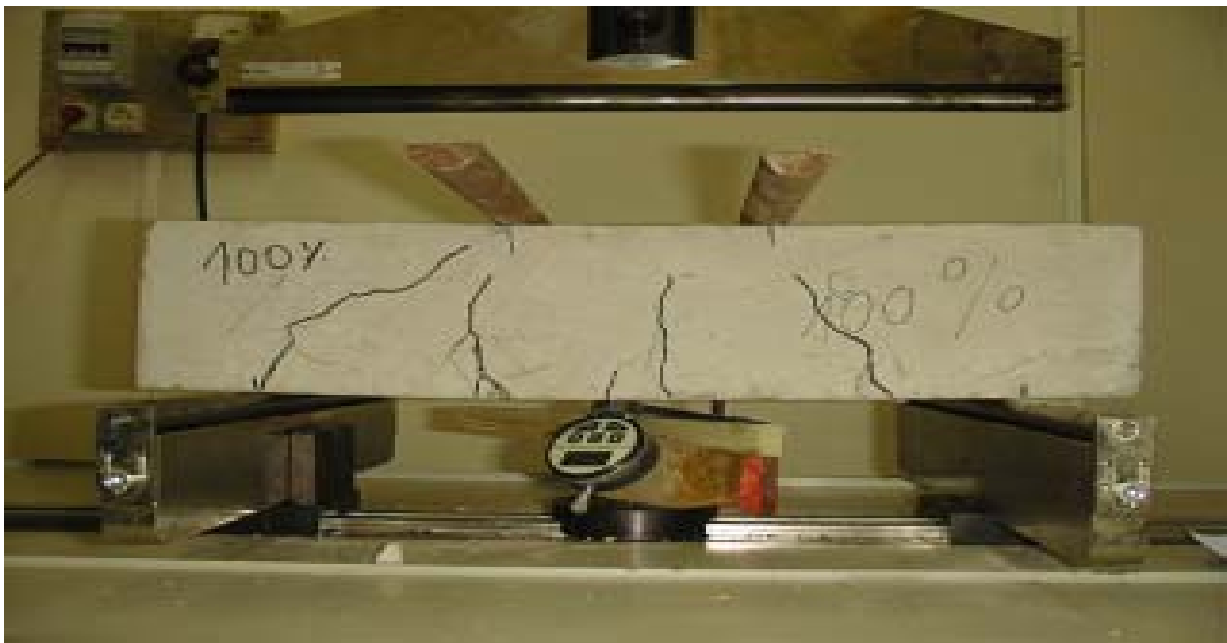


Figure IV.13.Répartition des macro fissures :

Cas de béton armé avec 100% de fibres



REMARQUE :

Toutes les images montrant la mise sous chargement ; dispositifs d'essai ; types d'éprouvettes ; nature de ferrailage ; mode de comportement mécanique et fissuration ; sont présentées dans l'annexe I.

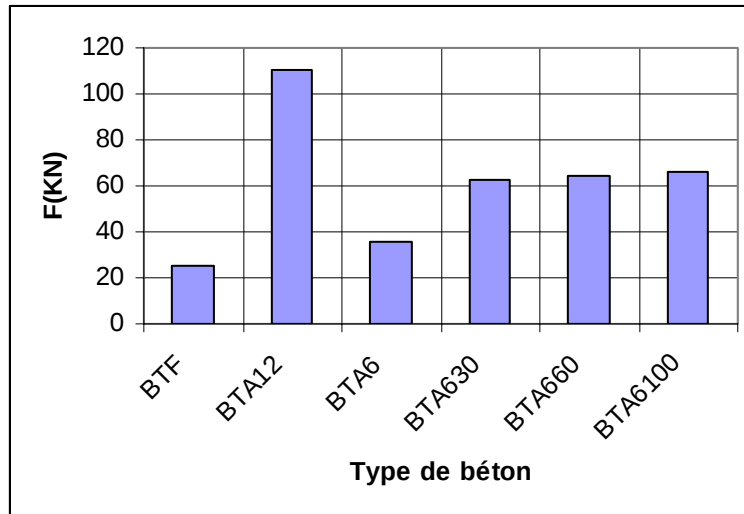


Figure IV.14. Variation de la résistance à la flexion selon la composition

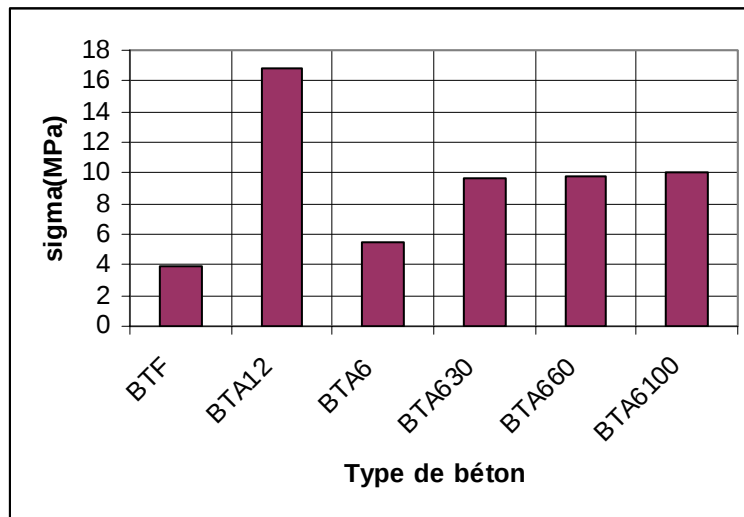


Figure IV.15. Variation de la contrainte à la flexion selon la composition

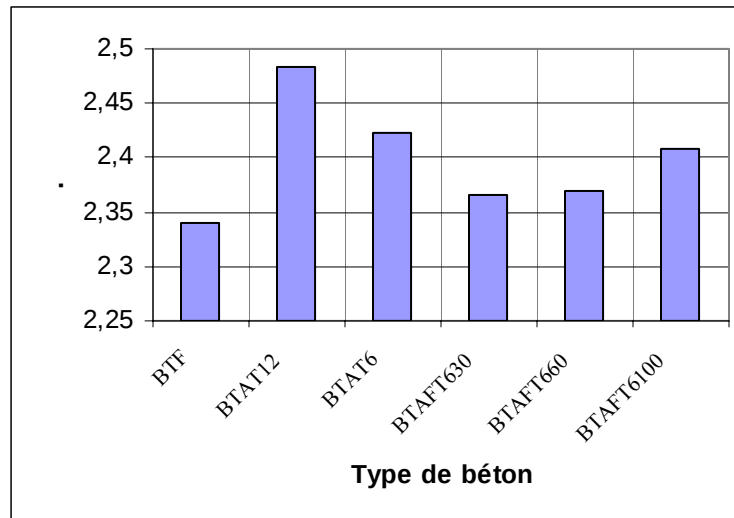


Figure IV.16. Variation de la masse volumique selon la composition

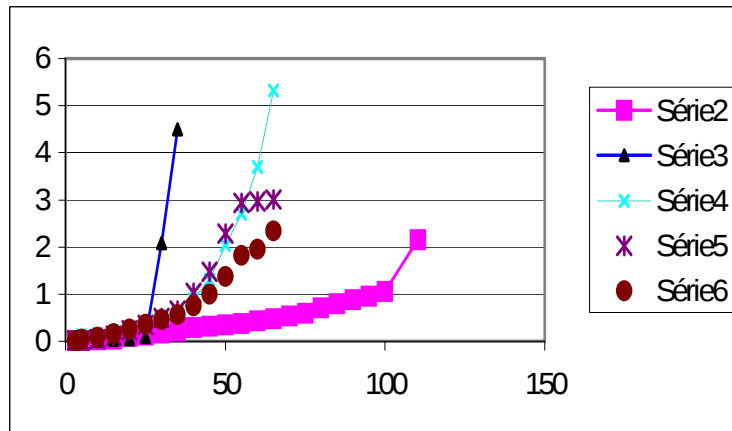


Figure IV.17. Variation de la flèche selon la composition

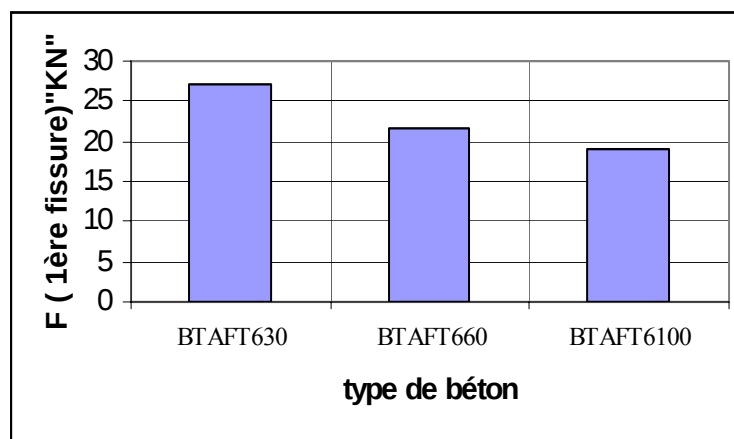


Figure IV.18. Force engendrant la 1^{ère} fissure selon la composition

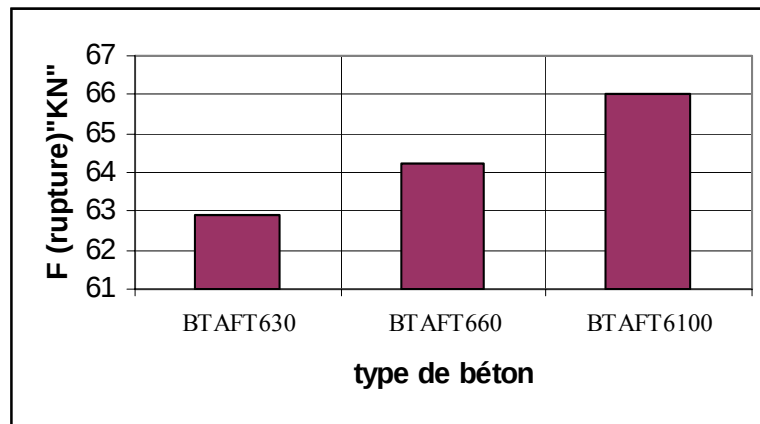


Figure IV.19.Force de rupture selon la composition

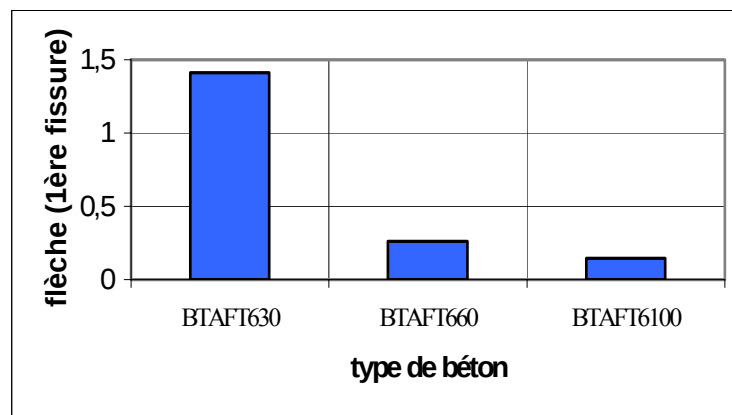


Figure IV.20. Flèches correspondantes à la 1^{ère} fissure selon la composition

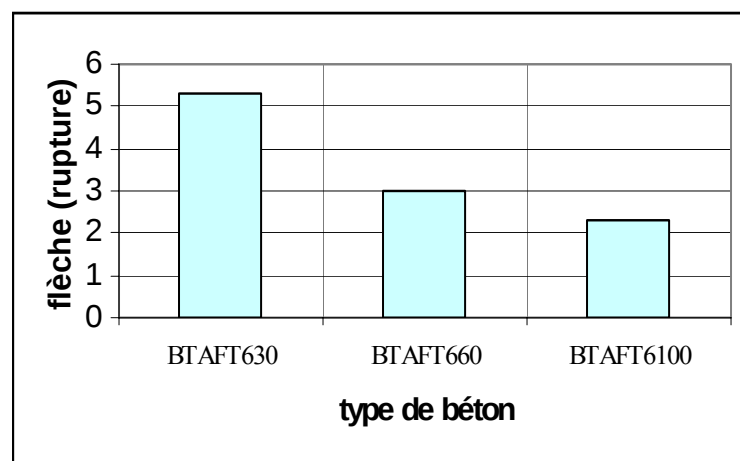


Figure IV.21. Fleches à la rupture selon la composition

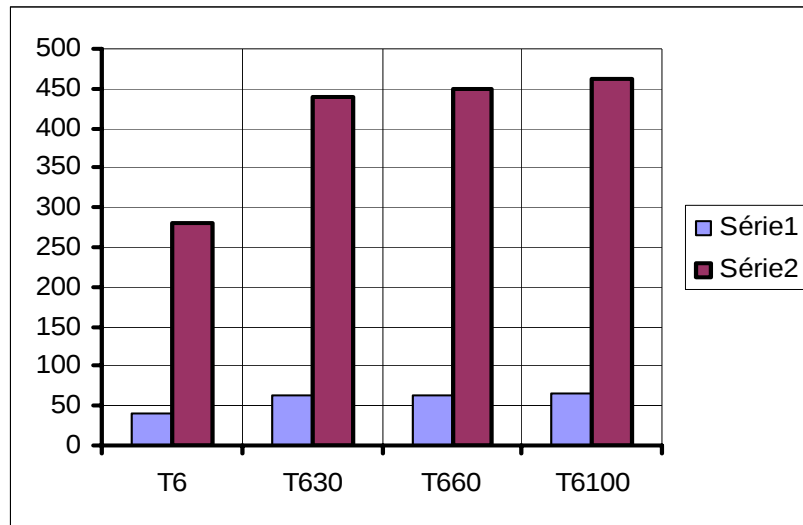


Figure IV.22. Moment de rupture selon la composition
Série 1 : Force ; Série 2. Moment de rupture

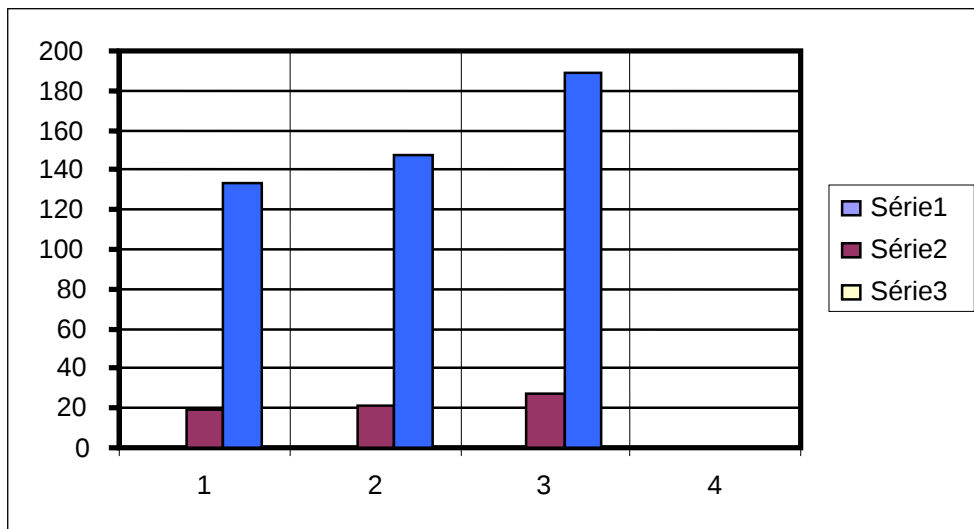


Figure IV.23. Moment de fissuration selon la composition
Série 1 : Force ; Série 2. Moment de fissuration

La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux, à savoir la variation des moments de rupture et de fissuration, est présentée sur les figures IV.23 et IV.24.

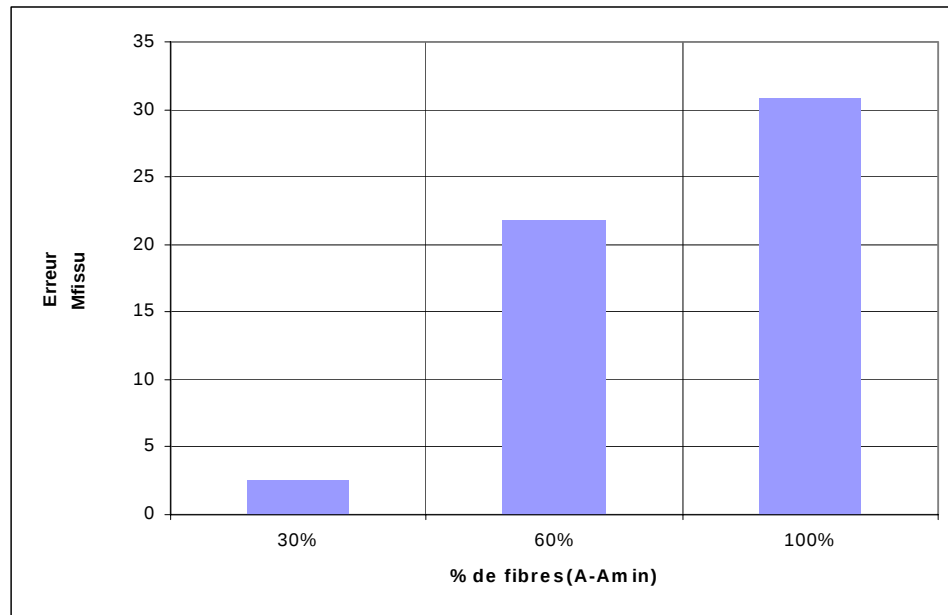


Figure IV.24. Variation de ' $\Delta M_{ser} / M_{ser}$ ' en fonction du pourcentage de fibres

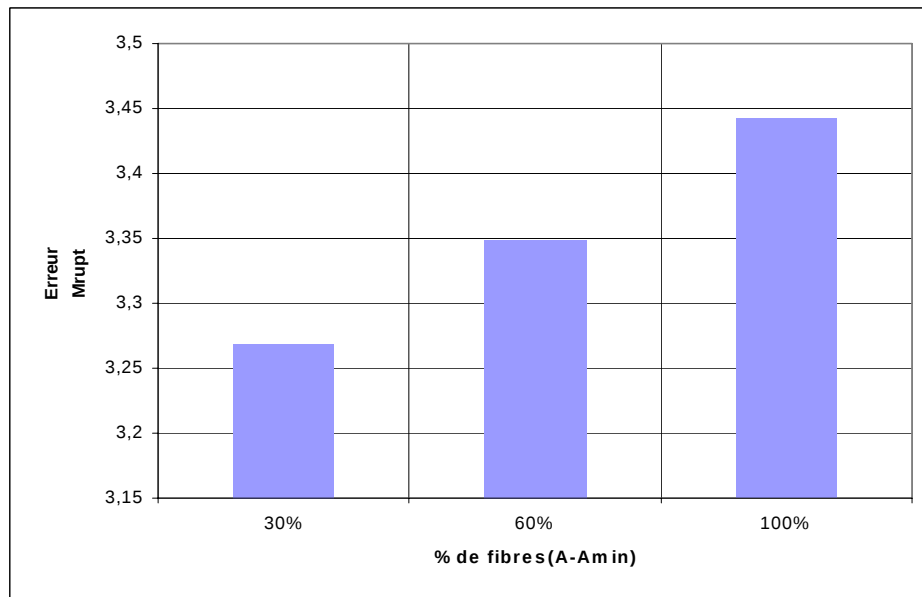


Figure IV.25. Variation de ' $\Delta \mu / \mu$ ' en fonction du pourcentage de fibres

IV.5.1. ANALYSE DES RESULTATS

Dans cette dernière étape ; nous présentons l'analyse des résultats obtenus expérimentalement et théoriquement. Une analyse détaillée est également donnée, où l'intérêt mécanique et économique de cette recherche est mis clairement en évidence

L'analyse des différents résultats nous permet d'en déduire ce qui suit :

- Pour la même section d'acier équivalente, le moment M_{ser} est plus important, d'où un gain en rigidité ;
- Avec un apport en fibres moins de 30% la section combinée peut résister à un effort appliqué supérieur à celui appliqué à la section ordinaire, d'où un gain en matériaux acier et en énergie, ceci est expliqué par le fait qu'on peut garder les mêmes dimensions géométriques mais on doit augmenter les charges ou bien en gardant le même chargement, on peut diminuer la section ;
- L'ajout des fibres permet d'augmenter la hauteur de la zone comprimée pour une sollicitation donnée, de l'ordre de 0.5 –9%. Ceci influe directement sur la rigidité ;
- Au delà d'un certain pourcentage de fibres, le, rapport M_{serf}/ M_{ser} amorce une légère diminution
- Les résistances en compression simple sont peu affectées par la présence des fibres.
- L'augmentation des résistances engendrant la première fissure en flexion est de l'ordre de 216%, 172 %, 70% respectivement selon le taux de fibres incorporées de 30 %, 60 % et 100 % par rapport au béton non armé).

- L'augmentation des résistances à la rupture en flexion est de l'ordre de 157%, 161 %, 165% respectivement selon le taux de fibres incorporées de 30 %, 60 % et 100 % par rapport au béton armé de T6 (section minimale exigée par le règlement)
- Les rapports de flèche sont de l'ordre de 1,2 ; 0,66 et 0,51 respectivement selon le taux de fibres incorporées de 30 %, 60 % et 100 % par rapport au béton armé de T6 (section minimale exigée par le règlement).
- La confrontation des résultats théoriques et expérimentaux confirme l'intérêt de notre approche. La corrélation entre les différents résultats est inférieure à 10% .
- Les éléments combinés présentent des rigidités meilleures par rapport aux éléments ordinaires. La flèche est nettement améliorée. Le comportement de ces structures sous sollicitations dynamiques telles que le séisme serait alors meilleur.
- Nous avons constaté une meilleure répartition des fissures. Dans les éléments combinés ; la formation de la fissure magistrale (principale) est retardée,
- Les fibres utilisées, issues de la récupération des câbles de freins des vélos et motocycles ; présentent une adhérence très intéressante, ceci est dû à sa nature et sa forme,
- La combinaison de ferrailage (traditionnel et fibres) est intéressante non seulement vu les performances mécaniques obtenues mais également par ses retombées économiques. Les fibres sont issues de récupération donc bon marché et la quantité d'acier à prévoir dans les éléments est revue à la baisse, tout en respectant les normes et notes de calcul en vigueur actuellement,

- Enfin, en conclusion, nous pouvons dire que cette approche a permis de rendre la matrice plus ductile, plus résistante, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie.

Conclusion du chapitre

L'analyse expérimentale du comportement des différents bétons (béton non armé, béton ferrailé avec des T12, béton ferrailé avec T6 et bétons armés combinés de fibres métalliques issues des câbles de freins) ; en compression et en traction par flexion a permis de mettre en exergue les performances et l'influence de ces types de fibres dans l'amélioration du comportement mécanique et surtout de conforter notre approche. On obtient ainsi des propriétés mécaniques très performantes pour des bétons de structures lourdes, tout en diminuant la quantité des aciers dans la matrice cimentaire pour le même effort sollicitant.

L'introduction des fibres en quantités minimales (30%, 60 % et 100%) dans les zones tendues seulement, a permis non seulement d'améliorer la rigidité de l'élément mais également a diminué la quantité de l'acier, d'où un gain énorme en énergie et en coût (gain en quantité d'acier ; main d'œuvre ; temps de réalisation, etc.).

Parmi les applications pratiques de cette approche, on peut recommander son application des les structures soumises aux sollicitations dynamiques telles que séismiques.

D'autres essais sont naturellement souhaitables pour en caractériser d'une manière plus poussée le comportement mécanique et structural des éléments soumis en flexion et compression simple et composée, en globalité.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Les innovations constructives, qui font souvent appel à de nouveaux matériaux, ont rendu les bétons renforcés de fibres très populaires. La possibilité d'améliorer la résistance à la traction et au choc, permet soit d'envisager une réduction du poids et de l'épaisseur des éléments (réduction des sections géométriques) soit d'augmenter la capacité portante (les charges sollicitant les éléments).

Les bétons armés de fibres ont fait l'objet, depuis une quarantaine d'années, de nombreuses recherches à travers le monde. Leur utilisation est très intense dans le domaine des dallages industriels et dans l'assainissement. Le domaine d'utilisation peut être étendu aux chaussées de parkings d'aéronautique etc. Sa capacité de résistance aux chocs et à l'abrasion peut intéresser bien d'autre domaine de l'industrie.

L'analyse des différents travaux antérieurs permet de conclure que l'utilisation des fibres métalliques courtes dans le béton permet non seulement d'améliorer les caractéristiques mécaniques telles que les résistances, la rigidité, mais également les autres propriétés physiques et mécaniques, sauf que la quantité de fibres à utiliser est très importante d'où une recherche dans le but de réduire cette quantité sans amoindrir les performances mécaniques est d'actualité. Ceci nous amène à l'idée de substitution d'une quantité d'acier traditionnel par des fibres courtes dans un rapport de proportionnalité avec la section minimale exigée par le règlement.

Un état limite correspond à un état particulier dans lequel la condition requise d'exploitation et de résistance est strictement satisfaite. La variabilité de la résistance et des autres propriétés physico mécaniques de la matrice cimentaire composite est tributaire des propriétés intrinsèques de ces constituants à savoir, pour un élément de poutre travaillant en flexion, celles du béton et de l'acier.

Les règles et normes actuelles, permettent de déterminer la section 'A' d'armatures nécessaire pour un effort donné sollicitant.

Dans un but de conférer à la section une meilleure résistance à la fissuration et à la rupture, on effectue une combinaison de ferrailage traditionnel égale au ferrailage minimal exigé par les règles de calcul « $A_{\min}$ » avec un ajout de fibres courtes métalliques en proportions limitées, dont la somme des deux sera égale ou inférieure à la section d'armatures équivalente calculée « A_c ». L'intérêt de cette approche est de permettre de rendre la matrice plus ductile, plus résistante, tout en assurant une certaine économie en matériaux et en énergie.

L'impact environnemental d'une utilisation des aciers étant élevé, pour cela. La valorisation des déchets pour une utilisation éventuelle dans l'industrie et dans la construction est souhaitée. Dans cette perspective une proposition a été retenue qui consiste à utiliser des fibres issues de la récupération des câbles de freins des vélos et motocycles.

Cette perspective a permis de mettre en valeur une nouvelle fibre issue de la récupération des câbles de freins des vélos et motocycles pour être exploitée dans le domaine du génie civil (béton armé de fibres).

Ayant constaté souvent dans les notes de calcul des éléments soumis en flexion simple une très grande différence de la section calculée par rapport à celle exigée par les règlements en vigueur, l'étudiant s'est intéressé à proposer, une approche qui consiste à remplacer la section de calcul "A" par une combinaison de la section minimale " $A_{\min}$ " exigée par les règlements de calcul et normes avec un pourcentage de fibres métalliques, dans un rapport de proportionnalité. La somme de ces deux dernières sections est au plus équivalente à la section totale "A".

Notre approche a fait l'objet d'un développement théorique, en établissant les relations d'équilibre avec l'hypothèse des sections planes et prise en compte des

caractéristiques intrinsèques des constituants en l'occurrence le béton, l'acier traditionnel et les fibres courtes; la formulation mathématique des éléments de réduction, en particulier le moment de fissuration et par déduction celui de rupture est aisément développée. La contribution des fibres de renforts est prise en considération à travers l'effort ' N_{bf} ' développé dans la zone tendue.

La partie expérimentale a été scindée en deux parties, à savoir l'identification physico-chimique des constituants et la caractérisation du comportement mécanique en compression simple et en traction par flexion de plusieurs types d'éprouvettes, en faisant varier le pourcentage des fibres dans la zone tendue de la section transversale de l'élément fléchi respectivement de 30% , 60% et 100% de la section 'Ac – Amin'

L'identification physico – chimique des constituants a permis de déterminer les propriétés intrinsèques à savoir : la distribution granulaire, l'équivalent du sable, le retrait ; la nature des fibres, les résistances du mortier selon la composition, etc.

L'analyse des résultats des essais en compression et en traction par flexion du mortier a permis de mettre en exergue les performances et l'influence de ces types de fibres dans l'amélioration des performances du mortier renforcé, ce qui est de bonne augure quant au comportement mécanique des éléments en béton armé de fibres métalliques.

L'analyse expérimentale du comportement des différents bétons (béton non armé, béton ferrailé avec des T12, béton ferrailé avec T6 et bétons armés combinés de T6 (armature traditionnelle) et de fibres métalliques issues des câbles de freins respectivement de 30% , 60% et 100%.; en compression et en traction par flexion a permis de mettre en exergue les performances et l'influence de ces types de fibres dans l'amélioration du comportement mécanique et surtout de conforter notre approche. La confrontation des résultats obtenus expérimentalement montre une nette amélioration des résistances .On obtient ainsi des propriétés mécaniques très performantes pour des bétons de structures lourdes, tout en diminuant la quantité des aciers dans la matrice cimentaire.

L'introduction des fibres en quantités minimales dans les zones tendues seulement, a permis non seulement d'améliorer la rigidité de l'élément mais également a diminué la quantité de l'acier, d'où un gain énorme en énergie et en coût (gain en quantité d'acier ; main d'œuvre ; temps de réalisation, etc.).

Parmi les applications pratiques de cette approche, on peut recommander son application des les structures soumises aux sollicitations dynamiques telles que séismiques.

D'autres essais sont naturellement souhaitables pour en caractériser d'une manière plus poussée le comportement mécanique et structural des éléments soumis en flexion et compression simple et composée, en globalité.

Au terme de ce modeste travail, l'ensemble des résultats qui sont plus d'un titre très encourageant laisse entrevoir des études ultérieures d'affinement et de généralisation de cette approche et des perspectives énormes d'application pratique.

*Références
Bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ADAM** et NEVILLE .M. « Propriétés des betons ». Editions Eyrolles, Paris, 2000
- [2] ADJRAD Arezki « Renforcement du beton par des copeaux »Thèse de magister, UMMTO, 2000
- [3] K.AIT TAHAR.,, « Mode de rupture des poutres combinees en beton de fibres ». Annales des BTP ,N° 3 ; Paris ; Septembre 2001.pp. 5-10
- [4] ARNOULD .M et VIRLOGEUX .M. « Granulats et betons légers » Presse de l'école nationaux des ponts et chaussées, Paris, 1986
- [5] ATLAOUI . Dj « Etude d'une section en béton armé soumise a une flexion composée déviée en elasticite non linéaire »Thèse de magister, UMMTO, 2004
- [6] BAÏLON Jean Paul et DORLOT Jean Marie. « Des matériaux » Editions de l'école polytechnique de Montreal, 1986
- [7] BERTHELOT, J-M ; « Matériaux composites- comportement mécanique et analyse des structures », Paris : Tech- doc, 1999-642p..
- [8] Y BOUAFIA, B.FOURE., M S KACHL., « Relation effort ouverture des fissures dans le cas du beton arme de fibres d'acier »,Annales de l'ITBTP N°2, Avril 1998
- [9] CHEETHAM, C.J. AND P. MAGUIRE. «Coating of Glass Fiber », U. S. Patent 4,173,486, 1979.
- [10] DREUX Georges et FESTA Jean. « Nouveau guide du beton et de ses constituants » Editions Eyrolles, Paris, 1995
- [11] DUPAIN R, LANCHON R et SAINT-ARROMAN JC « Granulats, Sols, Ciment et Bétons » Editions Casteilla, Paris, 1995

- [12] KHELOUI Fatma. « Conception et etude de beton conçus a partir de fibres issues de l'industrie de recuperation locale »Thèse de magister, UMMTO,
- [13] KHENFER Mohammed Mouldi. « Caractérisation structurale et rheologique des ciments et plâtres renforcés de fibres de cellulose » These de doctorat, université de Bordeaux I, 1990
- [14] KODUR . V.K.R « Tenue au feu des elements de structure en beton haute resistance » Conseil national de recherches du Canada. 1999
- [15] KOMAR .A. « Matériaux et element de construction)) technique soviétique. Traduction française, éditions Mir, Moscou, 1978
- [16] LANCHON .R. Cours de laboratoire « granulats, betons, sols » tome I et II. Editions Casteilla, Paris, 1989
- [17] MAJUMDAR, A.J AND J.F. RYDER. «Glass Fiber Reinforcement of Cement Products)), Glass Technology, Vol 9(3), p 78-84, 1968
- [18] MAJUMDAR, A.J. AND RW. NURSE. «Glass Fiber Reinforced Cement, Materials » Science and Engineering, Vol. 15, p 107-127, 1974.
- [19] NOLJOWE .A, AGGOUN .S et CABRILLAC .R.« Mechanical properties of lightweight aggregate concrete after exposure at high temperature»2nd international symposium on **structural** lightweight aggregate concrete.Kritiansand, Norway2000
- [20] NOLJOWE .A, AGGOUN .S et CABRILLAC .R.« Influence du type de granulats sur les proprietes de betons a matrice hautes performances soumis à une temperature élevée »Annales de l'ITBTP, octobre - novembre 2001-N°5 ,pp 9-16
- [21] PIMIENTA .P & REMOND .S.« Bétons de dechets, prévenir les risques » CSTB magazine, N°109 , - nov.1997. pp28-30.

- [22] PRAT Michel. « La modelisation des ouvrages » Editions Hermès, Paris, 1995
- [23] F.N.RABINOVICH., « Dispersno armirovani bétoni », Ed. Stroizdat-M, 1989.
- [24] RAMACHANDRAN, V. S. ((Super plastifiants et beton », Conseil national de recherches du Canada, Division des recherches en bâtiment, Digest de la construction au Canada n° 203F, mai 1979.
- [25] ROSSI P ,« les bétons de fibres métalliques » Ed Presse de l'ENPC , 1998
- [26] SAAD M. ; « Contribution a la modelisation du comportement post-fissuration du beton arme en traction »Thèse de magister, UMMTO, 2004
- [27]TROTIGNON .JP, PIPERAUD .M, VERDU .J et DOBRACZYNSKI .A. « Précis de matières plastiques, structure – propriétés – mise en œuvre et normalisation». Edition Fernand Nathan, Paris, 1982
- [28] YOUSFI Saadia. « Etude correlative de différentes methodes de composition du beton »
These de magister, centre universitaire Mohamed Boudiaf de Msila, 2000
- [29] BUILDING RESEARCH STATION. «A Study of the Properties of Cem-Fil/ OPC Composites », Building Research Establishment Current Paper, CP 38/76, Garston, England, 1916 Publié a l'origine *en juillet* 1982.
- [30] Reglement BAEL 1991
- [31] Revue Française de Génie Civil ; Vol.4-N° 6- octobre 2000, pp 607-651

ANNEXES

y'	b	Amin	n	d	mu	h	c
7,16592732	14	0,565486678	15	11	0	14	3
			sigmast	sigmafib	sigmabt	sigmabft	sigmabc
			40	110	0,2502	0,02502	31,7
%fibre	Pruptexp	Mruptexp	y'	lx	Sigmabc	Mrupthéor	
0,0051932	62,9	440,3	7,28613	3444,3908	0,93139	426,36	
0,0103865	64,21	449,47	7,39836	3551,6485	0,93628	434,9	
0,0173108	66,04	462,28	7,53719	3686,7047	0,9451	446,89	
0	39,88	279,16	7,1659	3331,42	0,60047	259,38	
	Pfiss	Mfissu	y'	lx	Sigmabc	Mfissurthéo	
	27	189	7,28613	3444,3908	0,3998	182,37	
	21,58	151,06	7,39836	3551,6485	0,31467	160,26	
	19	133	7,53719	3686,7047	0,27191	140,59	

Tableau de calcul par EXCEL

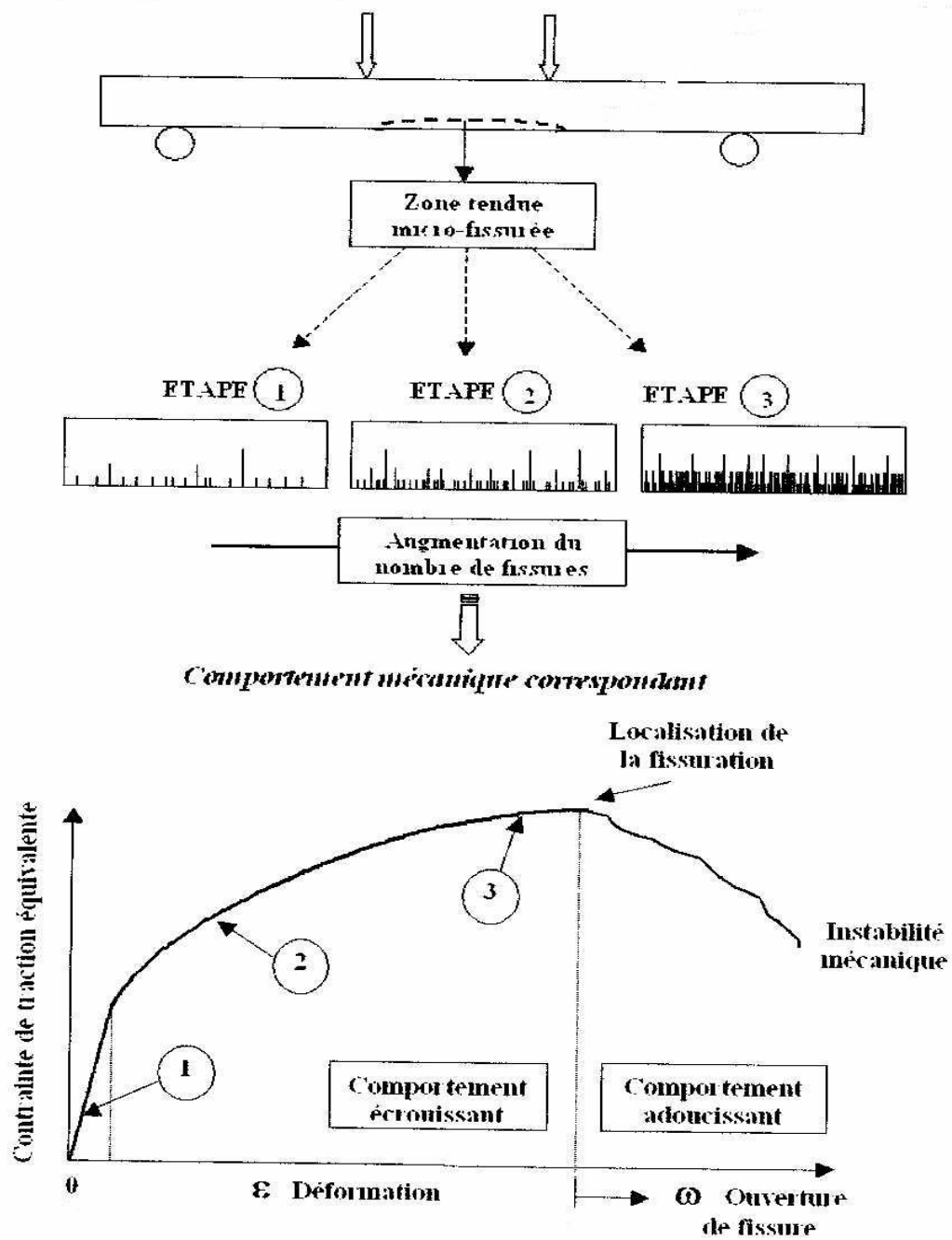


Figure A.1. Mode de comportement mécanique des bétons

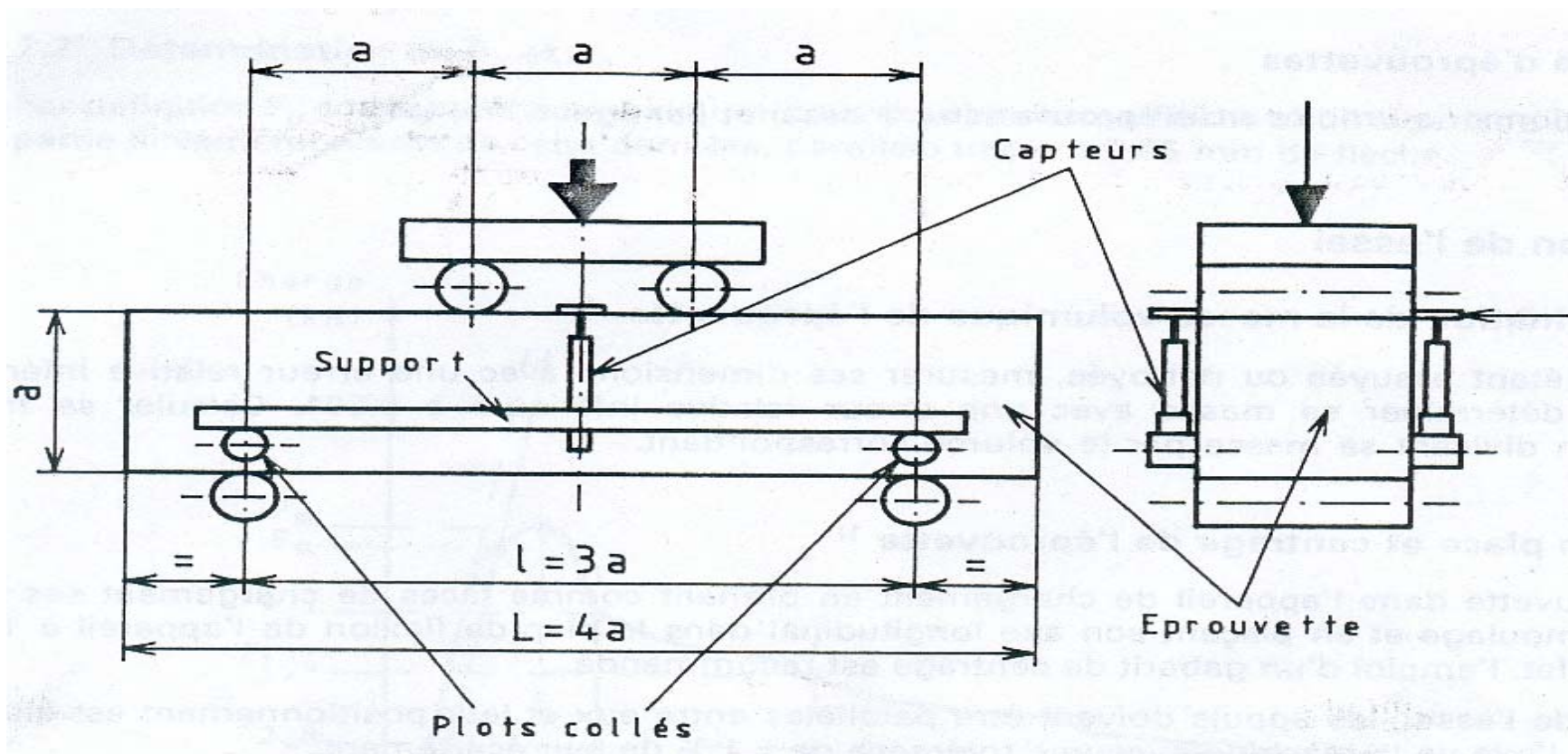


Figure A.2. Mode de préparation de l'essai de flexion



Image A.1. Malaxage du BAF



Image A.2. Affaissement du BAF

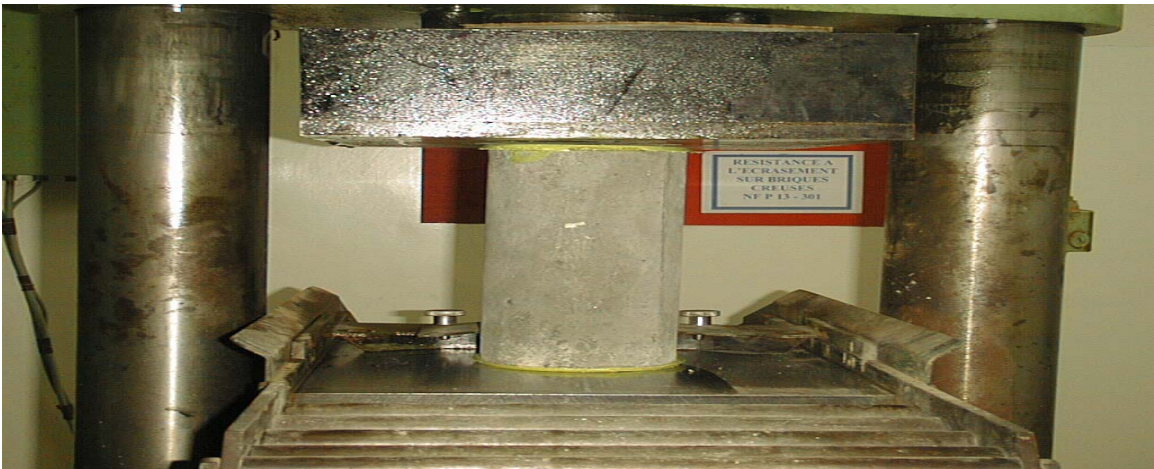


Image A.3. Essai de compression



Image A.4. Remplissage des moules



Image A.5. Vibration par table



Image A.6. Finition de l'opération de moulage



Image A.7. Positionnement de la poutre

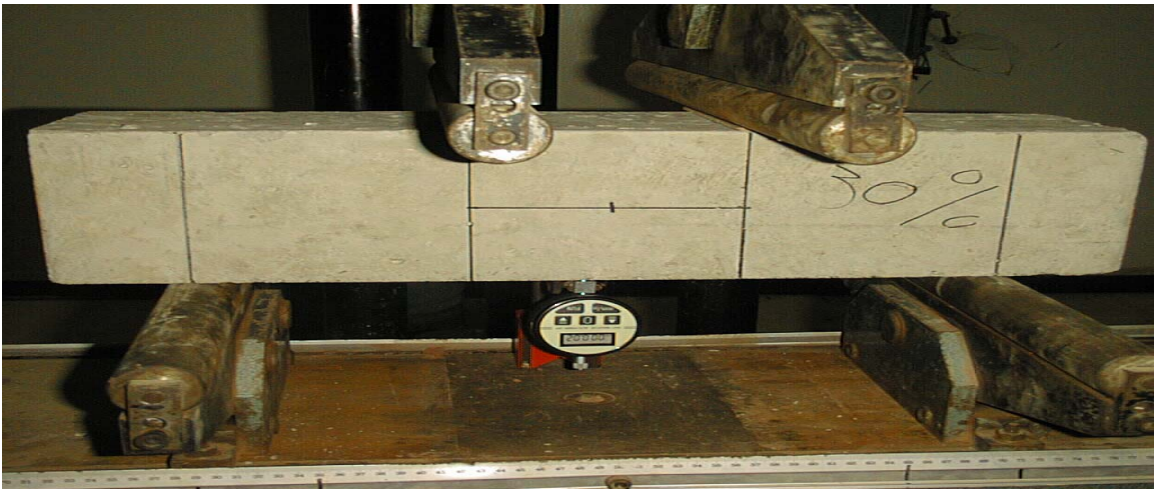


Image A.8. Repérage des points d'appuis

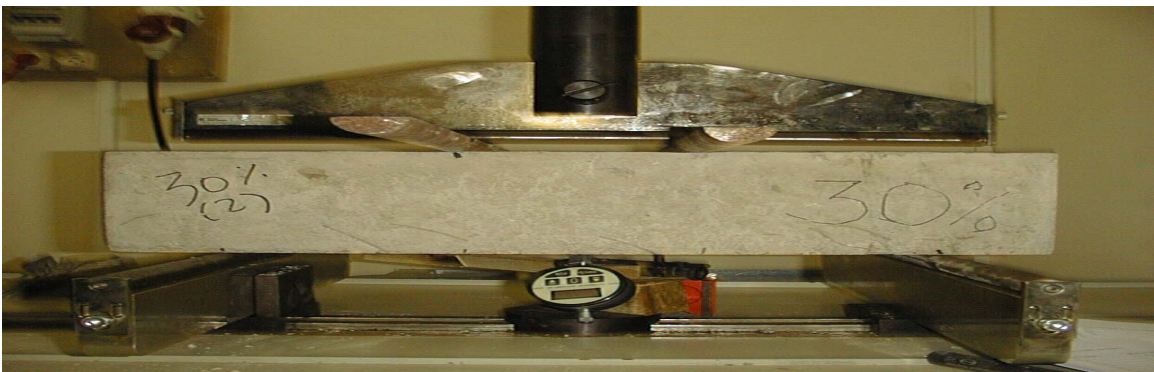


Image A.9. Essai de flexion



Image A.10. Mode rupture des éprouvettes en béton armé

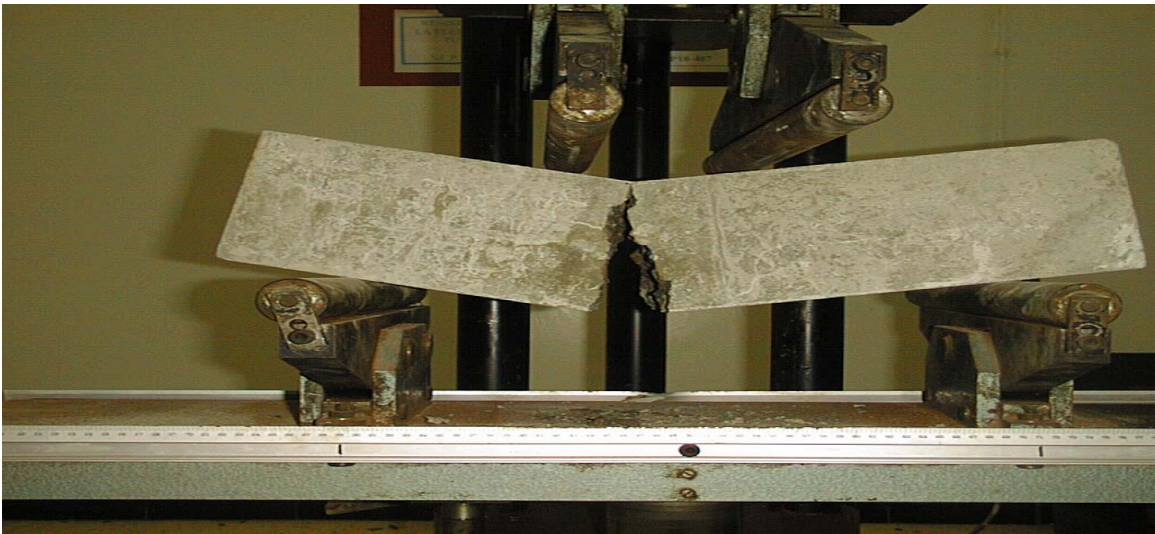


Image A.11. Mode de rupture du béton témoin



Image A.12. Rupture finale

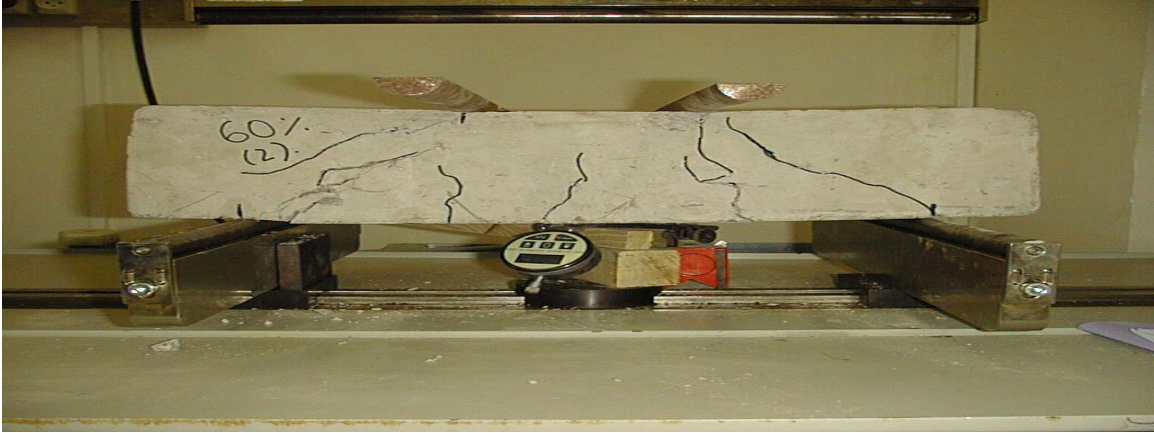


Image A.13. Schéma de propagation des fissures