

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Civil



Mémoire de fin d'étude

**En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie civil
Option : structures**

Thème

**Effet des fibres longues « déchet d'usinage des pièces en acier »
sur le comportement du béton.**

Proposé et dirigé par:

M^r. ATLAOUI Djamel

Présenté par :

BETTOUCHE Hakima

ép. DEGUICHE

Remerciements

Je tiens à exprimer, en premier lieu, ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué chacun à sa manière dans la réalisation de ce mémoire de fin d'études à savoir: mes enseignants, mes collègues, mes amis et ma famille.

Que M^r ATLAOUI Djamel, mon promoteur trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour son encadrement, ses précieux conseils et sa disponibilité.

Il m'a en plus apporté toute son aide en mettant à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail.

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

Un grand merci à mes PARENTS et à mon mari YAHIA DEGUCHE pour leur soutien.

Je remercie messieurs MAMOU, BOUHRAOUA, L. LAMARI et Mme BENAHMED Ep MEDJBER pour avoir été disponibles et m'avoir secondée dans la réalisation des éprouvettes et la réalisation des essais.

Enfin, je remercie LYNDA BOUAZIZ et AKILA AMARNI" et mes collègues à QNET pour leur soutien moral tout le long de ce travail.



Dédicaces

A mes très chers parents pour leurs affection et leurs précieux conseils, qui veillent toujours à ma réussite voyez à travers ce travail mon amour sincère et ma gratitude profonde.

A mon mari: DEGUICHE YAHIA

A mes sœurs: ZAKIA, SAMIRA, SOUNIA, SELIA

À mes frères: LOUNES, RABAH, GAYA

A ma grands mère :ALLAM TASSADITE

A MA TANTE : FAZIA , son mari ALI et leur enfants: SAMY, YANI, ET CYFAL.

À la mémoire de : ma tante "BETTOUCHE OUARDIA" et de mon Grand Père maternelle "BETTOUCHE Mohammed", mon grand père paternelle "BETTOUCHE AKLI" et a ma grande mère paternelle "KHELOUI Fatima".

A tous mes autres proches et à mes amis qui sont très chers chacun le sait sans citer les noms

Et spécialement à vous qui vous êtes en train de lire ce modeste travail en ce moment



RESUME

Les fibres en acier sont de plus en plus utilisées pour le renforcement du béton, notamment dans le cas des éléments minces. Elles remplacent ou complètent les armatures classiques selon le type de structure. Dans le cas des dallages (éléments minces) et du béton projeté (voûtes), on observe un gain de productivité.

Dans le but d'étudier et de comprendre l'effet que peut avoir des fibres longues sur le comportement du béton, nous avons mené une étude expérimentale sur des éprouvettes armées de ces fibres longues. Les fibres en question proviennent des déchets d'usinage des pièces métalliques (recueillis chez l'entreprise nationale des véhicules industrielles [*SNVT*]).

Une étude de caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres ondulées, sous sollicitations statiques (traction uni axiale) à été menée a fin de déterminer la résistance maximale à la rupture de la fibre et à l'arrachement).

La composition du béton est déterminée par la méthode expérimentale dite « Dreux-Gorisse ».

Le comportement mécanique de ce matériaux est caractérisé par des essais de [flexion, cisaillement], pour un béton témoin BT (sans fibres) et pour les teneurs en fibres retenues pour cette étude ($W=0,6\%$ et $W= 0,8\%$).

Les résultats obtenus, comparativement au béton témoins BT (sans fibres), sont encourageants.

Mots clés : fibres longues / caractérisation / traction directe /mode de fissuration /flexion/ cisaillement/ résistance/ effort tranchant/ductilité.

TABLE DES MATIERES

PAGE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-TECHNOLOGIE DU BETON ARME DE FIBRES	3
I.1.1 Introduction	3
I.1.2 Définition du Béton	3
I.1.3 Définition du Béton armé de fibres	4
I.1.4 Rôle des fibres dans le béton	4
I.1.5 Fabrication des bétons de fibres.....	5
I.2 Applications du béton armé de fibres	5
I.2.1 Introduction :	5
I.2.2 Quelques sites d'application et l'intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton.....	6
I.2.2.1 Canalisation et coques minces faiblement sollicitées.....	6
I.2.2.2 Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés et tous les éléments structuraux soumis à la flexion :	6
I.2.2.3 Eléments structuraux soumis à la compression : (poteaux, pieux, fondation ... etc)	6
I.2.2.4 Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles.....	7
I.2.2.5 Structures soumises à des sollicitations combinées :	7
I.2.2.6 Travaux routiers	7
I.2.2.7 Béton projeté	7
I.2.2.8 Ouvrages hydrauliques	8
I.2.2.9 Structures anti-explosives	8
I.2.2.10 Eléments préfabriqués	8
I.2.2.11 Poutres, linteaux, consoles	9

I.3 Formulation du béton de fibres.....	9
I.4 Les différents types de fibres.....	9
I.4.1 Les principaux types de fibres	9
I.4.1.1 Les fibres non métalliques	10
I.4.1.2 les fibres métalliques utilisées.....	10
I.4.2 Les différents types de fibres couramment utilisées en Europe.....	11
I.5 Les qualités indispensables des fibres.....	12
I.6 La maniabilité des bétons des fibres	12
I.7 Optimisation du béton de fibres (BFM) par la méthode Baron Lesage.....	12
I.8 Influence des fibres noyées dans le béton	15
I.8.1 Influence du pourcentage des fibres.....	15
I.8.2 Influence de l'orientation des fibres	16
I.8.3 Traitement thermique du béton frais et chauffage du béton durci par effet Joule	17
I.9 Propriétés PHYSIQUES ET mécaniques des bétons armés de fibres	18
I.9.1 Géométrie de la fibre.....	18
I.10 Comportement en flexion et A L'effort TRANCHANT « cisaillement » des bétons armés et des bétons armés de fibres	20
I.10.1 Introduction.....	20
I.10.2 Essais de l'université de São Paulo Brazil.....	21
I.10.3 Essais de l'université de South Korea	26
I.10.4 Travaux de T.M. Roberts et N. L. H	30
I.10.5 Essais de l'université North Carolina state Etats-Unis (USA)	34

DEUXIEME PARTIE: ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION	41
CHAPITRE II : CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES ONDULEES EN SPIRALES ISSUES DES DECHETS D'USINAGE DES PIECES EN ACIER.	
II.1 Introduction.....	42

II.2 Etude expérimentale	42
II.2.1 Géométrie de la fibre et système d’ancrage	42
II.2.2 Appareillage et essai	44
II.2.3 Présentation des résultats	44
II.4 Conclusion	48

CHAPITRE III : ETUDE DE LA COMPOSITION DU BETON

III.1.1 Introduction	49
III.1.2 Les liants :	49
III.1.3 Les sables :	49
III.1.4 Les granulats	51
III.1.5 Les adjuvants et additifs.....	52
III.1.5 .1 Les adjuvants	52
III.1.5 .2 Les additifs	52
III.1.6 Rôle des différents éléments constituant le béton.....	52
III.2 Analyse granulométrique.....	52
III.2.1 Principe de l’essai :	53
III.2.2 Equipements utilisés	53
III.2.3 Description de l’essai.....	54
III.2.4 Module de finesse	57
III.3 Composition de béton par la méthode de Dreux-Gorisse :	57
III.3.1 Résistance visée.....	57
III.3.2 Dosage en ciment et eau :	57
III.3.3 Dosage des Granulats.....	60

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT EN FLEXION ET AU CISAILLEMENT DU BETON RENFORCEE PAR DES FIBRES LONGUES.

IV.1 INTRODUCTION	63
-------------------------	----

IV.2 Géométrie et composition des poutres testées :	63
IV.2.1 Géométrie.....	63
IV.2.2 Mise en œuvre des poutres renforcées des fibres longues	65
IV.2.3 Composition des éprouvettes.....	65
IV.2.4 Appareillage et essais	66
IV.3 Description des essais.....	67
IV.4 Essais de flexion 3-points.....	67
IV. 4.1 Présentation des résultats et discussions.....	68
IV.4.2 Résultats des essais flexion 3- points	68
IV.5 Essais de rupture a l'effort tranchant (flexion 4-points):	72
IV. 5.1 Présentation des résultats et discussions.....	73
VI.5.2 Résultats des essais de rupture à l'effort tranchant	73
VI.6 Conclusions.....	79
CONCLUSION G E N E R A L E	80

CHAPITRE I.

Figure I.1 Rôle des fibres dans une matrice [7].	5
Figure I.2 Différents types de fibres métalliques[a,b,c,et d] [36].	11
Figure I.3 Différents types de fibres utilisées[33].	11
Figure I.4 Détermination du rapport S/G optimal [10].	13
Figure I.5 Variation de la maniabilité du béton de fibres en fonction du rapport S/(S+G) (Ecoulement au maniabilimètre LCL) [10].	14
Figure I.6 Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône d'ABRAMS [19].	15
Figure I.7 Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'éclatement L/D [11].	15
Figure I.8 Effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [14].	16
Figure I.9 Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturation [9].	17
Figure I.10 Diagramme d'essai d'une dalle Conventionnelle sans renforcement par fibres d'acier [13].	19
Figure I.11 Diagramme d'essai d'une dalle de béton, sous charge ponctuelle renforcée de 20 kg/m ³ de fibres d'acier EUROSTEEL [13].	19
Figure I.12 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90 ⁰ , 2 ondulations) [1].	20
Figure I.13 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90 ⁰ , 3 ondulations) [1].	20
Figure I.14 (a) Géométrie, (b) Renforcement des poutres série A, (c) Renforcement des poutres série B [14].	22
Figure I.15 Position et nombres de jauges installées [14].	22
Figure I.16 Vue des poutres série A après les essais [14].	23
Figure I.17 Vue des poutres série B après les essais [14].	23

Figure I.18 Force- Flèche des poutres série A [14].	24
Figure I.19 Force- Flèche des poutres série B [14].	24
Figure I.20 Déformations dans les étriers aux points E3-E4 [14].	24
Figure I.21 Déformations dans les armatures longitudinales aux points A3-A4 [14].	25
Figure I.22 Dispositif d'essai des poutres testées [15].	27
Figure I.23 Comparaison des différentes résistances relatives en fonction des teneurs en fibres [15].	27
Figure I.24 Mode de fissuration pour les différentes poutres testées [15].	28
Figure I.25 Courbe charge-flèche pour les Poutres sans étriers [15].	28
Figure I.26 Courbe charge-flèche pour les poutres avec 50% des étriers conventionnels [15].	28
Figure I.27 Résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].	29
Figure I.28 Résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].	29
Figure I.29 Détails de chargement des poutres testées [16].	31
Figure I.30 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=24$ [16].	31
Figure I.31 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=16$ [16].	32
Figure I.32 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=8$ [16].	32
Figure I.33 Rapport du moment théorique/ moment à la rupture en fonction de rapport a/d [16].	33
Figure I.34 Description des poutres testées en béton normale et à haute résistance [20].	36
Figure I.35 Dispositif d'essais utilisée [20].	36
Figure I.36 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé léger avec armatures transversales [20].	37
Figure I.37 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé à haute résistance avec armatures transversales [20].	38
Figure I.38 Effet de la résistance du béton sur la flèche à mi-travée pour un béton léger sans armatures transversales [20].	38
Figure I.39 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger [20].	39
Figure I.40 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger à haute résistance [20].	39

Figure I.41 Effet de la résistance du béton en compression sur la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger [20].	40
---	----

CHAPITRE II.

Figure II.1 Vue des fibres longues.	43
Figure II.2 préparation du système d'ancrage dans le moule à l'aide de la résine.	43
Figure II.3 Vue de dispositif d'essai.	44
Figure II.4 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 01.	45
Figure II.5 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 02.	45
Figure II.6 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 03.	46
Figure II.7 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 04.	46
Figure II.8 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 05.	47
Figure II.9 Superposition des courbes $\sigma = f(\epsilon)$ pour les 05 essais réalisés.	47

CHAPITRE III.

Figure III .1[SABLE 0/3].	50
Figure III .2 [GRAVIER3/8].	51
Figure III .3[gravier 8/15].	51
Figure III.4 Courbe Granulométrique.	56
Figure III.5 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de L'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).	62

CHPITRE IV.

Figure IV.1 : fibres utilisées avant étirassions	63
Figure IV.2 : une partie d'une fibre utilisée de longueur L=10cm	64
Figure IV. 3 Moules prismatiques et fibres longues utilisées ainsi que le vibreur.	64
figure IV.4 : disposition des fibres et le béton pour une hauteur des poutres H=20cm.	65

Figure IV.5 Vue du dispositif d'essai « Ibertest ».....	66
Figure IV.6 Schéma statique de l'essai de flexion 3- points.....	67
Figure IV.7 Exemple d'essai flexion 3-points.	68
Figure IV.8 Exemple du mode de rupture des poutres lors des essais flexion 3-points.....	68
Figure IV.9 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.....	69
Figure IV.10 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,6%.	70
Figure IV.11 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,8%.	70
Figure IV.12 Superposition des Courbes moyennes force-flèche pour BT, W=0,6% et W=0,8%.....	71
Figure VI.13 Schéma statique de la série d'essais en flexion 4- points.	72
Figure IV. 14 Exemple d'essai flexion 4-points.	73
Figure IV.15 Début d'ouverture de fissure diagonale pour une force F= 80.68 KN.	73
Figure IV.16 Ouverture de fissure diagonale pour une force F= 86.78 KN.	74
Figure IV.17 Ouverture de fissure diagonale pour une force F= 94.03 KN.	74
Figure VI.18 Mode de rupture des poutres testées lors des essais de rupture a l'effort tranchant pour une teneur en fibre w=0 ,8%.....	75
Figure VI.19 Mode de rupture d'une poutre testée montre les bords de la fissure qui sont reliés par les fibres.....	75
Figure IV.20 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.....	76
Figure IV.21 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,6%.	77
Figure IV.22 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,8%.	77
Figure IV.23 Superposition des Courbes moyenne force-flèche pour BT W=0,6%,W=0,8%.....	78

LISTE DES TABLEAUX.

	PAGE
Tableau I.1 Caractéristiques du mélange des poutres testées [14].....	21
Tableau I.2 Caractéristiques des aciers et fibres utilisées [15].	26
Tableau I.3 Détails des spécimens des poutres testées [16].....	30
Tableau I.4 Caractéristiques des poutres testées [20].....	35
Tableau I.5 Charges (ultime) et type de rupture des poutres testées [20].....	37
Tableau III.1 Analyse granulométrique du sable.	54
Tableau III.2 Analyse granulométrique pour le gravier (3/8).....	55
Tableau III.3 Analyse granulométrique pour le gravier (8/15).....	55
Tableau III.4 Valeurs approximatives du coefficient granulaire	58
Tableau III.5 Constituants du béton pour un volume de 1 m ³	61
Tableau III.6 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m ³ de béton.....	62
Tableau IV.1 Compositions optimisées pour 1 m ³ de béton et pour une éprouvette [10x20x120] cm. .	65
Tableau IV.2 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m ³ de béton et pour une éprouvette prismatique [10x20x120] cm.	66
Tableau IV.3 : forces à la rupture en flexion	69
Tableau IV.4 : forces a la rupture des poutres testées	76

Liste des Symboles

Première partie : Etude bibliographique.

Symbole	Signification
L _f	Longueur de la fibre.
D	Diamètre de la fibre.
E	Module élastique (Module de Young).
V _f	Pourcentage en fibres.
V _{eb_e}	Temps nécessaire pour le remoulage, dans un moule cylindrique posé sur une table vibrante, du béton démoulé du cône d'ABRAMS.
α	Facteur d'orientation des fibres.
ω	Pourcentage en volume des fibres.
A _f	Surface de la section d'une fibre.
L _c	Longueur critique.
τ _u	Contrainte de cisaillement.
L _{min}	Longueur d'ancrage particulière.
$\bar{\tau}$	Contrainte d'adhérence.
σ _{fu}	Contrainte de rupture de la fibre
M _f	Moment réel à la rupture.
M _u	Moment ultime basé sur un calcul théorique en flexion.
T	Béton témoin.
F	Béton de fibres métalliques à crochets.
BT	Béton témoin (sans fibres).
BA	Béton armé.
f _t	Résistance à la traction.
f _{ft}	Résistance à la traction par flexion.
P	Charge maximale.
φ	Diamètre.
L/D	Elancement des fibres.
M _u	Moment max théorique.
M _f	Moment max à la rupture.
f _{cc}	Résistance à la compression du béton testé.
f _{ct}	Résistance à la traction du béton testé.
LNN-1	
L	Béton léger.
N	Résistance normale (ordinaire).
N	Poutres sans armatures transversales (sans étriers).
1	Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d)
LHW-2	
L	Béton léger
H	Haute résistance.
W	Poutres avec armatures transversales (avec étriers).
2	Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d).

Deuxième partie : **Etude expérimentale.**

Symbole	Signification
D	Diamètre des mailles des tamis.
m_{tam}	Module des tamis.
G	Coefficient granulaire.
γ	Masse volumique des fibres.
W	Teneurs (pourcentage) en fibres.
σ_c	Contrainte de compression.
E	Module de Young.
L	Longueur de la fibre.
l	Largueur de la fibre.
ϕ	Diamètre apparent de la fibre.
e	Epaisseur de la fibre.
n	Nombre d'ondulations de la fibre.
S	Section transversale des éprouvettes cylindriques.
L'	Longueur de l'éprouvette.
L''	Distance entre deux appuis.
a	Distance entre appuis et le point d'application de l'effort.
b	Largeur de l'éprouvette.
h	Hauteur de l'éprouvette.
F	La charge appliquée.
f	Flèche.
ε	Déformation.
St	Espacement des armatures transversales.
f_e	Limite élastique des aciers.

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau dont les performances en traction sont faibles par rapport à celles en compression. Pour l'utilisation efficace d'un tel matériau, il a été nécessaire de le renforcer par des aciers qui reprennent les efforts de traction : le béton armé. Le renforcement de la zone tendue du béton par des armatures en acier a permis le développement de ce matériau dans le bâtiment et les travaux publics. Cette solution, outre toutes ses qualités (résistance, formulation relativement simple, facilité de mise en œuvre...), présente néanmoins deux inconvénients : ce matériau est fortement hétérogène et son comportement en traction reste du type fragile. De plus, sa mise en œuvre se heurte parfois à la complexité du ferrailage.

Par consensus, les bétons de fibres métalliques ne peuvent substituer aux bétons armés traditionnels. Toutefois, des chercheurs ont proposé de les associer aux bétons armés et donc remplacer partiellement les armatures traditionnelles tel que : le remplacement des armatures transversales (CHANVILLARD. G) [1]. Les efforts ainsi déployés ont permis d'envisager l'utilisation des propriétés des BFM (Béton de fibres métalliques) pour remplir des tâches bien précises telles que : Réparations des revêtements routiers, les domaines des dallages industriels, les pistes d'aérodromes, les murs de soutènement, ce béton peut aussi être utilisé pour augmenter la résistance au feu du béton armé car les fibres limiteraient les ouvertures de fissures et protégeraient ainsi les armatures traditionnelles du rayonnement thermique.

Dans la présente étude expérimentale, nous nous intéressons à des fibres « locales » pour le renforcement du béton. Ces fibres proviennent des déchets d'usinage des pièces en acier « fibres longues ». Elles sont récupérées à la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI). Leur forme géométrique et ondulée en spirales leur confère un ancrage parfait dans la matrice cimentaire.

Afin de suivre le comportement du béton armé renforcé avec ce type de fibres « fibres longues », des essais mécaniques (flexion et des essais de cisaillement (rupture à l'effort tranchant) ont été réalisés sur des machines (au Laboratoire de modélisation des matériaux et structures de génie civil à L'université M.M de Tizi-Ouzou). Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques, [10x20x120] cm pour les pourcentages (teneurs) en fibres ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$), ainsi que les bétons témoins BT($W=0\%$).

Avant de mener une étude expérimentale il convient d'avoir un maximum de renseignements issus de recherches déjà effectuées dans le domaine. Nous consacrons donc le premier chapitre à l'étude bibliographique.

Le second chapitre consiste en la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres utilisées, sous sollicitations statiques (Traction uni axiale), à fin de déterminer la résistance à la traction des fibres utilisées, qui permettra d'améliorer les performances mécaniques en particulier la résistance.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la composition du béton, dans laquelle on décrit la méthode dite « Dreux-Gorisse », utilisée pour le calcul des masses des composants du béton.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude du comportement en flexion et au cisaillement « rupture à l'effort tranchant » du béton de fibres. Des séries d'essais en flexion (des essais de flexion 3- points) et des essais de cisaillement « des essais flexion 4- points » sur des éprouvettes prismatiques de dimensions [10x20x120] cm ont été réalisées au laboratoire de Génie-Civil, pour suivre le comportement de ces bétons armés renforcés de ces fibres longues en flexion ainsi que au cisaillement.

Enfin, une conclusion générale termine ce travail où nous présentons les différentes remarques et suggestions pour une suite future.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-TECHNOLOGIE DU BETON ARME DE FIBRES

I.1.1 Introduction :

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage, son excellente résistance en compression, sa bonne tenue au feu et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction : des fibres qui sont naturelles ou synthétiques. Cela conduit à un matériau composite (nouveau béton). Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes pour améliorer la résistance à la traction, à la flexion ou au cisaillement d'une pièce, des recherches importantes ont été faites sur ce nouveau matériau qu'est le béton de fibres, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques et le procédé de mise en œuvre de ce matériau. Plusieurs auteurs, dont on peut citer [2, 3, 4, 5, 6,], ont permis de mettre en évidence les performances de ce composite; à savoir :

- une bonne résistance à la traction, à la fatigue et aux chocs,
- un comportement ductile après la première fissuration,
- une facilité de mise en œuvre.

L'utilisation des fibres comme moyen de renforcement du béton ne s'est pas limitée uniquement au cas des fibres d'acier. Des fibres de verre, en matière plastique, de fonte et de polypropylène ont été utilisées, notamment pour renforcer les sols.

Dans cette présente étude, on se limitera au cas des fibres métalliques qui sont les plus utilisées pour le renforcement du béton.

I.1.2 Définition du Béton :

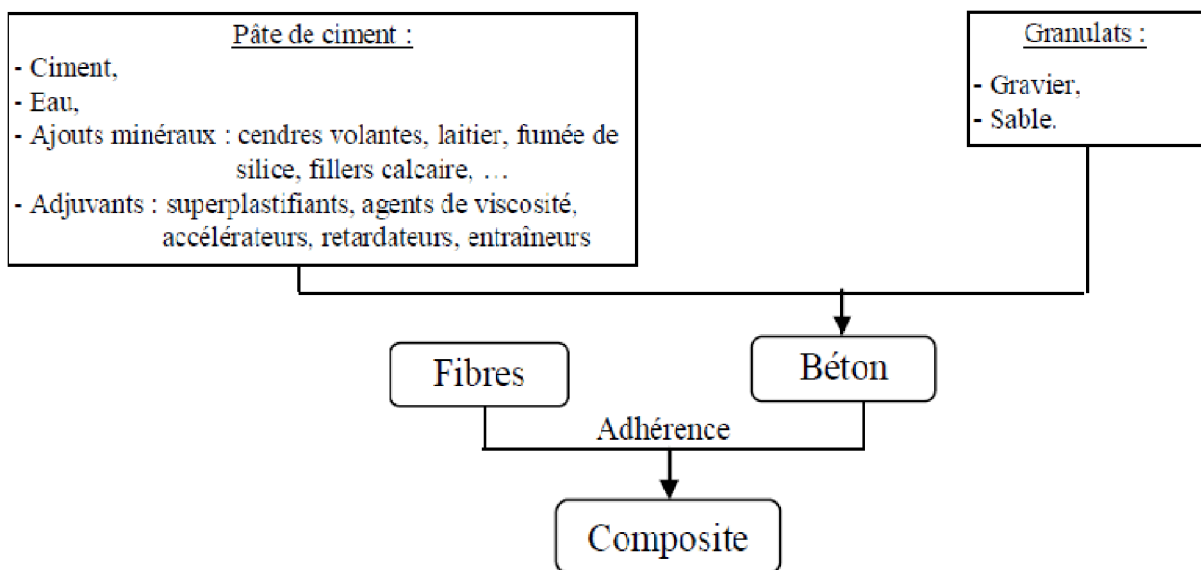
Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I.1.3 Définition du Béton armé de fibres :

Un béton armé de fibres est un mélange contenant une répartition de fibres discontinues dans une matrice de béton traditionnel. L'ajout des fibres a pour objectif d'obtenir un matériau **composite** « isotrope » présentant une meilleure résistance à la traction, un meilleur comportement post-fissuration, de remédier ainsi à son inconvénient majeur qui est son comportement du type fragile vis-à-vis de la traction.

Modèle de composite à base de fibres [36].



I.1.4 Rôle des fibres dans le béton :

Compte tenu de toutes les recherches entreprises dans ce domaine, le rôle des fibres est défini comme étant un contrôle de la fissuration du béton en état de service en rétrécissant les fissures et donc transformer le comportement ductile qui le sécurise lors des états de chargement ultimes (voir figure I.1).

Les phénomènes tels que le retrait, les contraintes appliquées au jeune âge sont la plus part du temps ingérables et occasionnent des microfissures dans le béton. Quand on soumet le béton à un effort de traction, les lignes de tension s'infléchissent en raison de l'impossibilité de la transmission de la charge à travers les fissures ce qui explique l'accroissement des tensions aux extrémités des fissures [7]. Lors d'un essai de flexion, la faible résistance du béton est atteinte en un laps de temps, ce qui provoque la création d'une fissure qui en se propageant conduit le matériau à une rupture fragile. Toutefois, les BFM parviennent à franchir ce seuil en transmettant une partie de cette force à travers la fissure via les fibres, ce qui nous laisse penser que l'efficacité des fibres réside en leur nombre et la qualité de leur ancrage [7].

« Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de " couture " des fissures. »

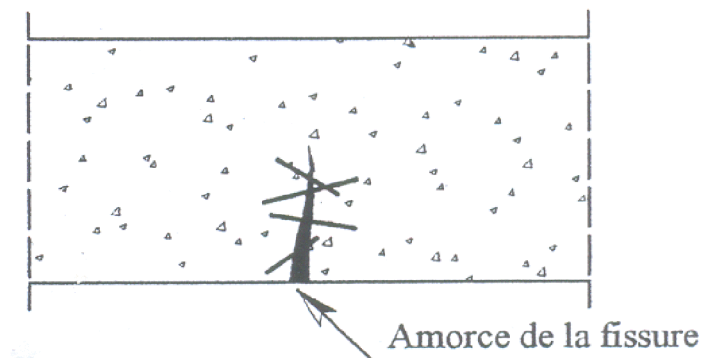


Figure I.1 Rôle des fibres dans une matrice [7].

I.1.5 Fabrication des bétons de fibres :

La nécessité de la fabrication d'un BFM fait qu'un dosage abusif des fibres à incorporer rend irréalisable le gâchage ainsi que la mise en œuvre. C'est pour quoi, et eu égard aux paramètres fondamentaux de dosage en volume, de forme et de rapport L/D qui peuvent influencer d'une part l'ouvrabilité et la mise en œuvre et d'autres part l'efficacité mécanique, une bonne mise en œuvre exige impérativement de fixer un dosage maximum en fibres à ne pas dépasser en aucun cas au détriment de l'efficacité mécanique [8].

I.2 Applications du béton armé de fibres

I.2.1 Introduction :

Depuis que le concept de béton de fibres a été connu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de fibre d'acier dans une matrice de béton permet au composite (béton de fibre) d'obtenir des propriétés très intéressantes. Mais, ce type de béton n'est pas considéré comme un substituant aux bétons ordinaires, mais comme un matériau d'un nouveau type, qui devient intéressant dans l'optique de la conception d'une structure performante.

En regardant le concept de béton des fibres, leur utilisation est naturellement orientée vers les éléments structuraux présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons conventionnels. Ceci ne veut pas dire que d'autres domaines stratégiques comme (fonderies, centrales nucléaires ... etc.) n'ont pas bénéficié de ce type de matériau. Le béton armé de fibres d'acier inoxydable a été expérimenté avec succès pour les parties exposées aux fortes variations de températures et même aux très hautes températures, en remplacement de revêtements réfractaires.

L'utilisation de ce type de matériau est facile car le matériel de chantier nécessaire est le même qui sert pour la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton routier ordinaire.

Donc, on peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres :

- 1) Le béton renforcé de fibres seules : Dans ce cas on utilise les propriétés des bétons de fibres qui seront liées à plusieurs paramètres. Ces paramètres sont généralement le type et les propriétés de matrice utilisée, type et propriétés des fibres utilisées, ainsi que la méthode de mise en œuvre retenue.
- 2) Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles : Dans ce cas on introduit les fibres dans les éléments structuraux en béton armé soumis à des sollicitations combinées afin de majorer la résistance et la rigidité des éléments concernés.

I.2.2 Quelques sites d'application et l'intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton :

I.2.2.1 Canalisation et coques minces faiblement sollicitées :

- amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges.
- modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration.

I.2.2.2 Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés et tous les éléments structuraux soumis à la flexion :

- diminution de 40 % de l'ouverture de fissures.
- augmentation de la rigidité après fissuration.
- augmentation de la résistance au cisaillement.
- augmentation de la résistance à l'usure.

I.2.2.3 Eléments structuraux soumis à la compression : (poteaux, pieux, fondation ...etc)

- amélioration de la charge ultime.
- pas de rupture catastrophique.

Exemples : Fondations

Fondations de machines

Leur résistance aux chocs, leur bonne résistance aux sollicitations dynamiques et l'isotropie des caractéristiques mécaniques des bétons armés de fibres pour reprendre des efforts d'orientation quelconque, les indiquent parfaitement pour ce type de fondation.

Fondations profondes

Pour remédier à la difficulté de mise en place des cages d'armature, le béton de fibres est utilisé afin de remplacer totalement ou partiellement les armatures traditionnelles. Dans le cas où la fondation doit résister à un fort moment fléchissant dans sa partie supérieure, des armatures traditionnelles peuvent être utilisées pour renforcer uniquement cette partie, ZHAN [9].

I.2.2.4 Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles

Exemples : Chaussées de route et pistes d'aérodrome : [31]

Grâce à une plus grande résistance à la fissuration et à la fatigue du **béton de fibres**, l'épaisseur d'une chaussée en BAF peut être la moitié environ de celle d'une chaussée en béton traditionnel, dans les mêmes conditions normales de charge.

Quelques exemples : construction de 52700 m² de chaussées de parking de l'aéroport de Las Vegas (Nevada) en BAF, avec 2 % de fibres en acier, épaisseur des chaussées 15 cm (alors qu'elle devrait être égale à 37.5 cm pour le BA traditionnel), trafics des DC 8, DC10 et Boeing 747 ; 33400 m² de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de Fallon (Nevada), 2 % de fibres acier, épaisseur 12.7 cm ; Pistes de l'aéroport international Tampa, USA : 1.5 % de fibres, épaisseur des pistes 10 cm et 15 cm, trafic des Boeing 727.

Donc :

- l'énergie absorbée est plus importante.
- la durée de choc est augmentée.
- loi de comportement du matériau est fortement modifiée.

I.2.2.5 Structures soumises à des sollicitations combinées :

- les majorations de résistances et de rigidités obtenues sous sollicitations simples ne se trouvent pas dans le cas du comportement sous sollicitation combinées.

I.2.2.6 Travaux routiers :

Leur bonne résistance aux chocs et à la fatigue a permis leur emploi courant dans la construction des routes et des pistes d'aéroport où les sollicitations dynamiques sont très fréquentes. La présence des fibres diminue aussi le retrait du béton.

I.2.2.7 Béton projeté :

L'emploi des fibres dans le béton projeté est souvent utilisé pour les constructions minières et la construction de tunnels ou la stabilisation des pentes. Dans ce domaine les fibres métalliques sont généralement utilisées.

I.2.2.8 Ouvrages hydrauliques :

L'utilisation du béton armé de fibres est une solution intéressante dans les cas suivants

-Les bétons mis en œuvre sous l'eau; La cohésion du béton apportée par les fibres permet la facilité de mise en œuvre.

-Les quais; la présence des fibres augmente la résistance aux chocs, au poinçonnement et à l'érosion.

-Les ouvrages ayant besoin d'une haute résistance à la cavitation.

I.2.2.9 Structures anti-explosives

D'après T. CUYKENS [32], les contraintes de cisaillement sont mieux reprises, la cohésion après fissuration, la résistance aux chocs, aux chocs thermiques et au fendage sont accrues par l'utilisation des fibres en acier combinées avec des armatures traditionnelles, ce qui rend intéressante l'utilisation de tels bétons dans :

- Les enceintes nucléaires.
- Les constructions de protection (par exemple les réacteurs nucléaires, les réservoirs).
- Le remplissage des joints entre éléments préfabriqués.

I.2.2.10 Eléments préfabriqués

Les dégâts dus au transport sont limités suite à la résistance plus élevée au fendage, aux coups et à l'effritement. Pour les structures minces, les armatures exigent un recouvrement minimum de 20 mm pour limiter les risques de corrosion et de fissuration, or, celles-ci subissent rarement des efforts importants. L'utilisation des fibres permet de réduire le volume de béton, les structures sont donc plus légères, alors plus faciles à manipuler. Dans ce domaine, les fibres les plus utilisées sont les fibres de verre et de propylène. Leurs utilisations sont fréquentes pour les structures préfabriquées telles que :

- Les parois.
- Les éléments de façade.
- Les traverses de chemins de fer.
- Les couvercles de caniveaux et de puits.
- Les barrières de sécurité.
- Les dalles de trottoir.
- Les tuyaux.
- Les poteaux des éclairages publics.

I.2.2.11 Poutres, linteaux, consoles

L'emploi des fibres permet de réduire l'armature d'effort tranchant ou la supprimer. L'armature principale peut également être supprimée dans les linteaux courts, T. CUYKENS [32].

I.3 Formulation du béton de fibres :

Le manque de méthodes de formulation des bétons de fibres a toujours posé un problème, mis à part les quelques méthodes empiriques que nous propose la littérature [10] et qui, dans certains cas, débouche sur des résultats erronés. Avec l'évolution de cette technologie et pour venir en aide aux

industriels qui s'intéressent aux BFM, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) a pu établir une méthode de formulation de ces bétons courants. La particularité de cette méthode, est qu'elle nous donne la possibilité d'avoir une composition à chaque fois spécifique. Par conséquent, elle conduit à un matériau optimisé vis-à-vis des objectifs escomptés. Ainsi selon que l'on souhaite avoir un BFM maniable, résistant ou ayant une influence sur la ductilité des structures, le matériau composite conçu sera totalement distinct [10].

Les deux hypothèses dont dépend la méthode dite Baron-Lesage sont :

1. Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C, fixe), le béton le plus maniable et le plus compact est celui qui a le squelette minéral le plus optimal.
2. Le dosage en granulats est indépendant de la nature et du volume de la pâte de ciment (eau+ciment).

Une troisième hypothèse vient se dresser pour renforcer les deux premières et assurer l'adéquation de cette méthode aux bétons de fibres métalliques dont l'énoncé est le suivant :

3. L'introduction des fibres métalliques n'influe en rien sur les deux premières Hypothèses.

I.4 Les différents types de fibres :

I.4.1 Les principaux types de fibres :

- les fibres de verre, dont la composition chimique est étudiée pour ne pas être attaquées par les alcalins du ciment, leur mise en place est assez facile à des dosages élevés. Elles sont utilisées pour les structures non porteuses. Elles ont un faible module d'élasticité.
- les fibres en fonte ductile. Elles ont une bonne adhérence.
- les fibres synthétiques, qui présentent une bonne tenue dans le temps et sont utilisées pour les dallages industriels. Les fibres de polypropylène sont recommandées dans le cas de risque d'incendie.
- les fibres de carbone dont des propriétés mécaniques sont excellentes mais présentant une mise en place difficile. Leur emploi est rarissime en raison de leur coût excessif.
- Les fibres d'aramide (kevlar), issue de la chimie organique, elles ont une bonne résistance à la traction, au choc et à la fatigue. Elles ont un prix élevé.
- les fibres naturelles (bambou, noix de coco, sisal, steppe, alfa, palmier, abaca, ...) offrent une résistance à la traction moyenne. Elles sont utilisées dans la fabrication des tuiles et dans le textile.
- les fibres métalliques qui sont les plus utilisées, du fait qu'elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques et offrent des performances importantes pour les bétons. Les fibres se divisent en deux catégories :

- Les fibres non métalliques et les fibres métalliques.

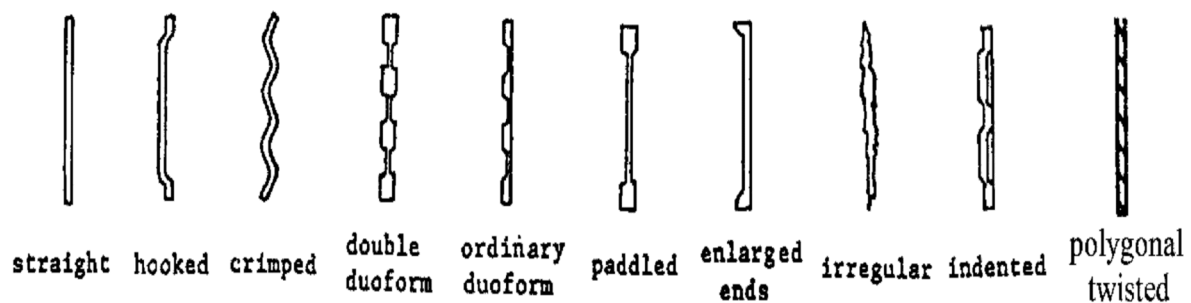
I.4.1.1 Les fibres non métalliques :

Selon le type de fibres, elles présentent des propriétés plus ou moins intéressantes et leurs applications sont limitées soit par le prix très élevé (fibres de carbone), soit par les problèmes de durabilité (les fibres de verre), soit à leurs mauvaises performances comme renfort (fibres de polypropylène). Certaines fibres naturelles présentent une instabilité dimensionnelle due soit aux cycles "séchage-mouillage". Parmi ces fibres, on peut citer les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres synthétiques et les fibres naturelles organiques ou minérales (coco, bois, amiante, bambou, Asbestos, abaca, chanvre, palmier, alfa, coton...). Les fibres végétales naturelles ne sont pas destinées pour les bétons à hautes performances.

Elles sont plutôt appliquées aux bétons ordinaires. Des fibres d'amiante ont été remplacées par les polymères pour leur effet nuisible sur la santé humaine.

I.4.1.2 les fibres métalliques utilisées :

La domination de ces fibres pour le renforcement des mortiers et des bétons vient du fait que l'acier a une bonne compatibilité avec le béton. De plus, le module d'élasticité de l'acier qui est environ sept fois plus élevé que celui du béton permet d'améliorer la ductilité du béton en mobilisant des efforts de traction dans ces fibres dès la fissuration. Ces fibres trouvent beaucoup d'applications réelles et potentielles dans le domaine du génie civil. Il existe de nombreuses variétés de fibres métalliques qui se distinguent par leur diamètre, leur section (ronde, carrée), leur limite élastique, leur longueur. Elles peuvent être rectilignes, crochetées, ondulées, tronquées, embouties ou en boucle (voir figure 1.2 [a, b, c et d]) [35,36].



(a) Formes des fibres métalliques

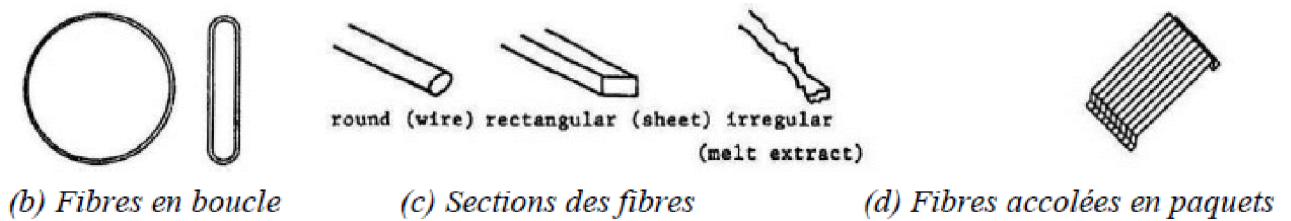


Figure I.2: différents types de fibres métalliques [a ,b ,c et d]. [36]

I.4.2 Les différents types de fibres couramment utilisées en Europe :

➤ **Fibres Dramix**

Ce sont des fibres à crochets (Figure 3); elles sont fabriquées en fil d’acier étiré à froid et ont une résistance à la traction de 1100 MPa. Pour le type standard $zc / 50 / 50$, elles ont une longueur de 50 mm et un diamètre de 0.5 mm. Elles se présentent sous forme de plaquettes de 10 à 12 fibres accolées. Lorsqu’elles sont introduites dans le béton la colle se dissout et les fibres sont réparties d’une manière aléatoire.

➤ **Fibres Eurosteel**

Ce sont des fibres ondulées sur toute leur longueur (figure I.3), en acier tréfilé avec une teneur en carbone de 0.25%. Leur résistance à la traction est de 1400 MPa et leur élongation à la rupture est de l’ordre de 14%. Il existe deux types standards :

- Eurosteel 60 / 100 (longueur 60 mm, diamètre 1 mm),
- Eurosteel 50 / 80 (longueur 50 mm, diamètre 0.8 mm).

➤ **Fibres Pont à Mousson**

Elles se présentent sous forme d’un ruban (figure I.3), de 1.5 à 2 mm de largeur et 60 mm de longueur, leur épaisseur est de l’ordre de 30 microns. Elles sont en fonte amorphe, leur résistance en traction est de 2000 Mpa.

➤ **Fibres Harex**

Les fibres Harex sont obtenues par fraisage de blocs d’acier (figure I.3), leurs dimensions sont de 32*2*0.25 mm. Elles ont une résistance de 700 MPa et un module de 200000 MPa.

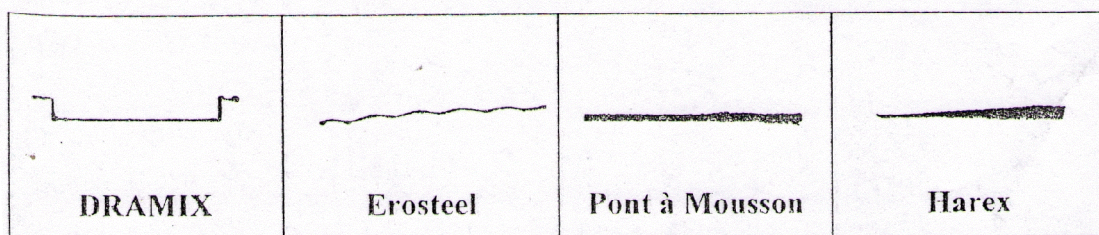


Figure I.3 Différents types de fibres utilisées[33].

I.5 Les qualités indispensables des fibres

Les qualités indispensables que les fibres doivent présenter sont les suivantes:

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment.
- Avoir une bonne résistance à la traction.
- Ne pas risqué d'être attaquées par le milieu basique du ciment.
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres.
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre.
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

I.6 La maniabilité des bétons des fibres

La maniabilité d'un BFM est capitale, selon la destination, pour en faciliter la mise en œuvre.

Ainsi pour avoir une étreinte sur le contrôle de l'ouvrabilité, il faut parvenir à gérer plusieurs paramètres et dont la maniabilité est étroitement liée.

1. Le dosage en fibres et l'élancement qui sont inversement liés à la maniabilité.
2. Le même phénomène est constaté avec une quantité abusive des gros granulats.
3. La rugosité de la surface des fibres et leur géométrie amplifient le risque de formation d'oursins de fibres au sein d'une matrice cimentaire [7].

I.7 Optimisation du béton de fibres (BFM) par la méthode Baron Lesage :

L'utilisation de la méthode **Baron Lesage** consiste à suivre les étapes qui suivent :

-Nous fixons au départ le rapport eau sur ciment (**E/C**) ainsi que le pourcentage de fibres à incorporer.

-Pour chaque valeur du rapport sable granulat (**S/G**), nous prélevons la maniabilité correspondante, ainsi nous traçons la courbe temps d'écoulement en fonction du rapport S/G, des lors et compte tenu de la première hypothèse, on extrait le rapport S/G pour lequel la maniabilité est optimale (voir figure I.4).

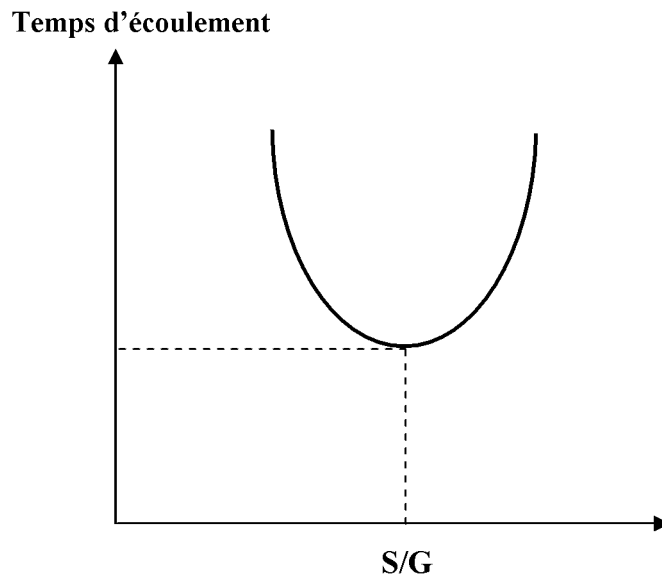


Figure I.4 Détermination du rapport S/G optimal [10].

Toutefois la maniabilité que l'on obtient en suivant le processus de cette méthode peut être différents de celle désirée, ainsi comme l'exige la deuxième hypothèse et pour remédier à cette situation paradoxale, nous pouvons jouer sur la quantité d'eau ou de ciment de telle sorte à maintenir le rapport E/C constant, ce qui nous conduira éventuellement à un mélange ayant plus de pâte de ciment.

Une recherche a été caractérisée au laboratoire central des ponts et chaussées et cela en étudiant deux types de fibres métalliques, les fibres DRAMIX collées par groupe sous forme de plaquettes et les fibres de fonte amorphe dites ponts à mousson. Cette étude portait sur l'influence de la longueur des fibres ainsi que de leurs pourcentages dans une matrice cimentaire [10].

La constatation qui a été faite est que plus est grand le pourcentage en fibres plus on doit augmenter le rapport S/G et la quantité de pâte de ciment en l'occurrence E+C (figure I.5).

Par conséquent cette observation a conduit aux déductions suivantes :

1. Il apparaît que le rôle des fibres s'apparente à celui d'un gros gravillon du squelette minéral.
2. Le béton que l'on obtient est beaucoup plus poreux pour cause d'augmenter la quantité de sable, fait qui est sensé être compensé par une quantité de pâte de ciment

en plus. Ce résultat, qui semble péjoratif, s'est révélé bénéfique pour l'assurance d'une adhérence mécanique plus ou moins parfaite entre fibres et pâte de ciment.

L'augmentation du rapport S/G ainsi que de la pâte de ciment est plus considérable pour un béton de fibres de fonte amorphe que pour un béton de fibres DRAMIX ; la raison en est simple, le phénomène est perceptible par le fait que les fibres de fonte amorphe possède une forme peu différente d'un gros gravillon que celle des fibres DRAMIX, ce qui signifie une substitution plus formelle entre fibres et gravillons.

Tous les résultats observés durant cette étude convergent vers les recommandations suivantes :

1. Fibres DRAMIX

- Le rapport S/G est pris égal à 1,075 pour un pourcentage en fibres égal à 1%.
- S/G varie entre 0,5 et 0,7 pour un pourcentage en fibres inférieur à 1% et cela pour une longueur de 60 mm.

2. Fibres de fonte amorphe

- S/G est compris entre 1 et 1,2 quand le pourcentage des fibres est entre 1,5% et 2%.
- Nous pouvons adopter une valeur du rapport S/G comprise entre 1 et 1,8 pour un pourcentage inférieur à 1%.

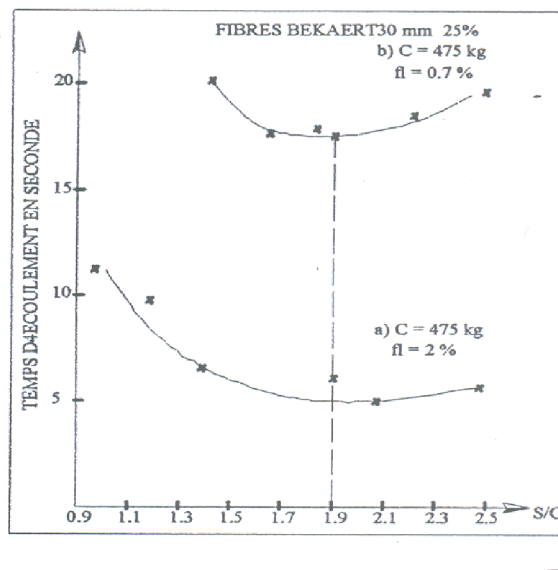


Figure I.5 Variation de la maniabilité du béton de fibres en fonction du rapport S/(S+G) (Ecoulement au maniabilimètre LCL) [10].

I.8 Influence des fibres noyées dans le béton :

I.8.1 Influence du pourcentage des fibres

Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle d'armature, contrôlent sa fissuration et lui confèrent une grande ténacité. Néanmoins l'ouvrabilité du mélange diminue avec la croissance de la teneur en fibres (figure I.6).

EDINGTON et al [11] ont montré la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres. (figure I.6).

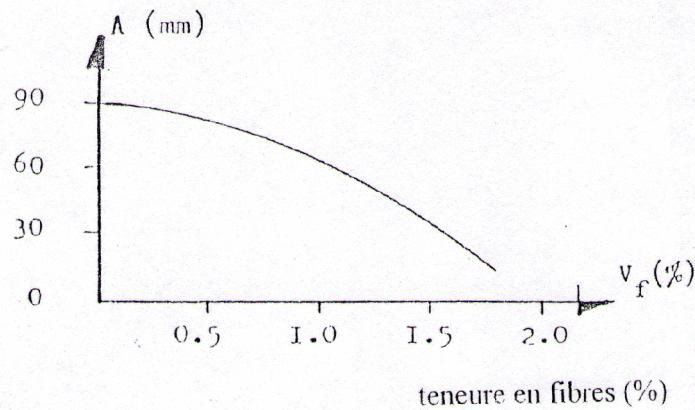
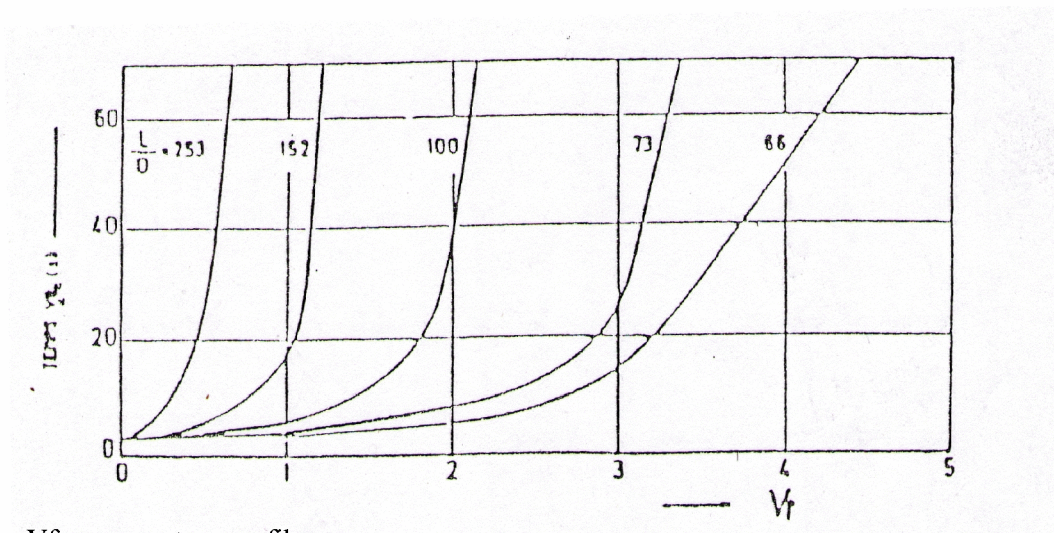


Figure I.6 Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône

EDINGTON et al [11] ont montré la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres (figure I.7).



Vf : pourcentage en fibres.

V_{eb} : Temps nécessaire pour le remoulage, dans un moule cylindrique posé sur une table vibrante, du béton démoulé du cône d'ABRAMS.

Figure I.7 Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'élanement L/D [11].

I.8.2 Influence de l'orientation des fibres

Une fibre orientée parallèlement à la direction d'application des contraintes et perpendiculairement à la direction de propagation des fissures joue l'effet le plus important, par contre une fibre perpendiculaire à celle ci n'a aucun effet.

D'après EDINGTON et HANNANT [3], la vibration du béton de fibres favorise une orientation bidimensionnelle des fibres, dans un plan horizontal, ce qui rend le matériau plus performant si cette orientation coïncide avec la direction des contraintes majeures. DEHOUSSE, LEJEUNE et KUYKENS

[30] ont montré que l'utilisation de la table vibrante provoque une orientation préférentielle des fibres, perpendiculairement au sens de la vibration.

Enfin l'étude d'EL HACHEM [4] permet de mettre en évidence l'effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite à la traction (figure I.8).

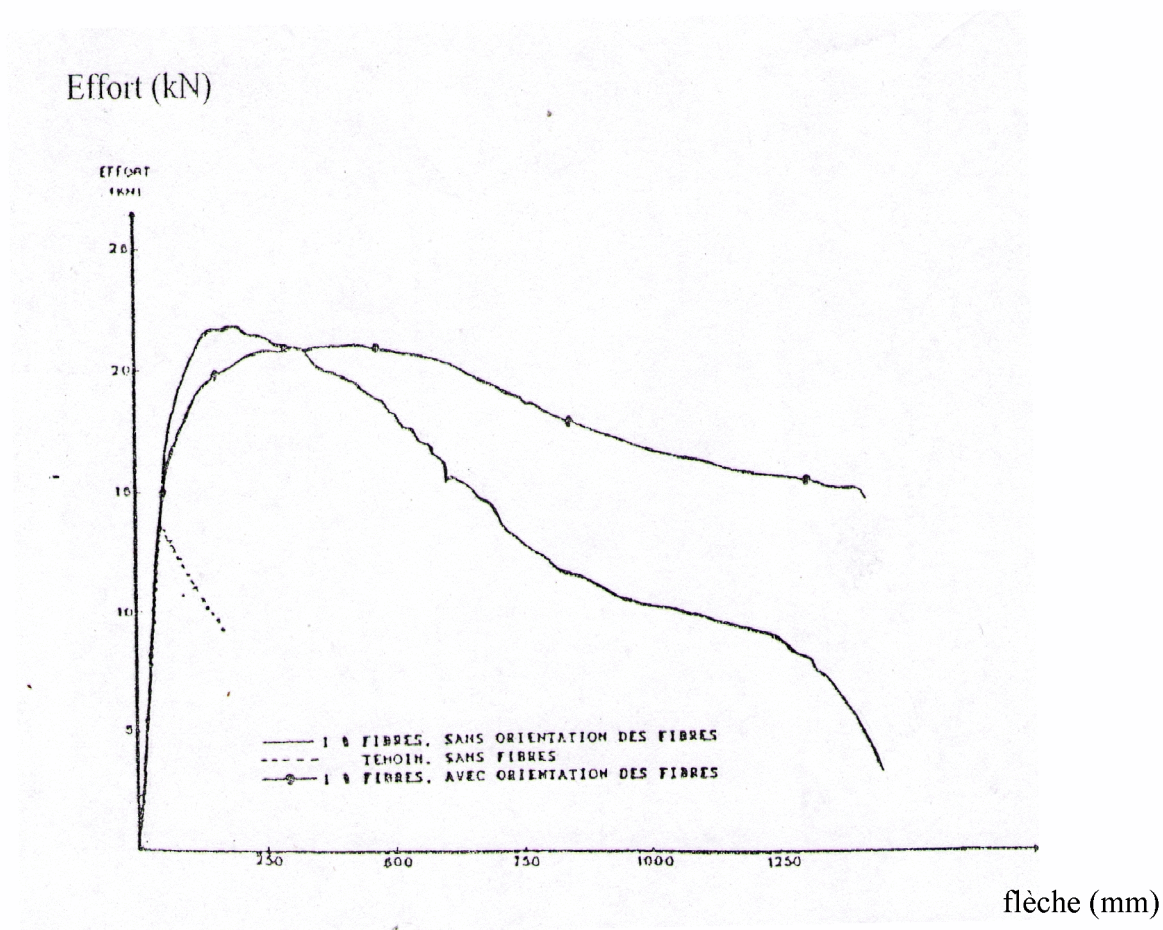


Figure I.8 Effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [14].

I.8.3 Traitement thermique du béton frais et chauffage du béton durci par effet Joule

Des études effectuées sur des dalles de dimensions variables montrent que dans le cas de traitement thermique les résultats obtenus sont analogues à ceux acquis avec les méthodes traditionnelles (Etuva) du point de vue cycle thermique et résistances, avec comme plus, une diffusion calorifique meilleure et uniforme.

De même, il est possible de chauffer un béton de fibres durci avec des tensions électriques d'autant plus faibles que le pourcentage en fibres est plus élevé. La résistivité électrique d'un béton durci pouvant être huit fois plus inférieure à celle du même béton sans fibres.

La conclusion qui se dessine est que la présence de fibres au sein d'un béton permet de lui associer, outre les avantages qu'elle lui fait éprouver (résistance à la flexion, résistance aux chocs...etc) une éventualité d'un ultérieur chauffage, ce qui donne de l'intérêt à cette qualité pour diverses utilisations telles que le diverglaçage des chaussées, des pistes d'aérodromes et manifestement pour le chauffage des bâtiments.....etc (figure I.9) [12].

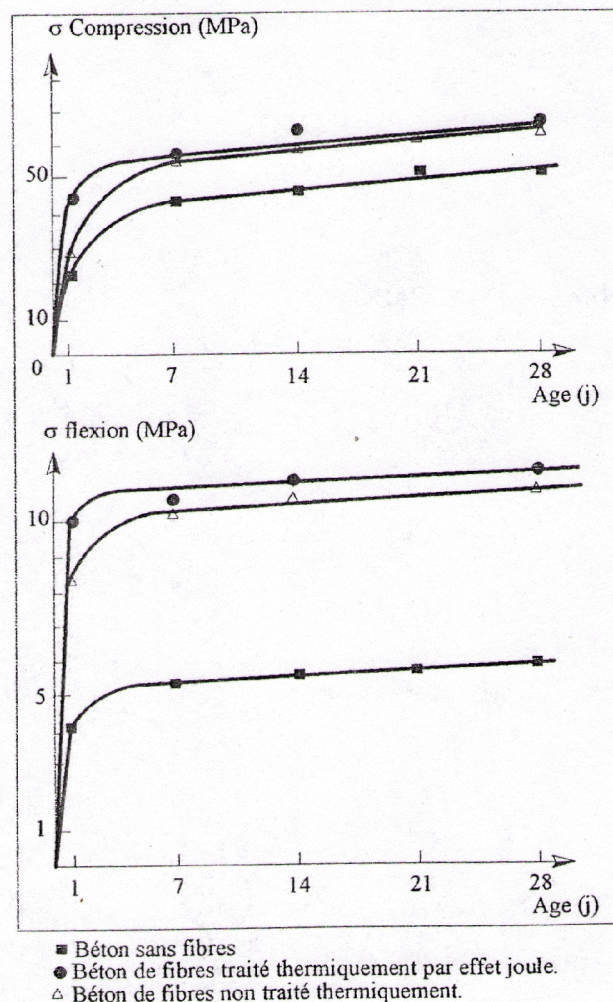


Figure I.9 Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturation [9].

I.9 Propriétés PHYSIQUES ET mécaniques des bétons armés de fibres

Afin d'éliminer toutes exagérations de dimensionnement des ouvrages en BFM ou de tout élément en faisant partie, ainsi que pour des raisons d'un fort lien entre le dimensionnement et l'application réservée pour chaque BFM, il nous est décisif d'avoir une connaissance pointue quant au comportement mécanique et thermique de ces matériaux [9].

I.9.1 Géométrie de la fibre :

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

1- En se plastifiant, l'ondulation diffuse, dans le béton, une énergie capable de multiplier par 2,5 celle de rupture en traction de la fibre [13].

2- Contrairement aux autres types de fibres, celles ondulées sont capables de s'agripper au béton. En effet, l'existence d'ondulations le long de ces fibres crée des réactions de butée et s'oppose par le fait au déchaussement de ces fibres ; ainsi la tension d'arrachement dite PULL OUT STRENGTH se retrouve comprise, en fonction de la constitution du béton considéré, entre 60 à 90 MPa [13].

Le panorama des essais de flexion entrepris sur des plaques de BFM (béton renforcé avec 20 kg/m³ de fibres EUROSTEEL) nous donne un agréable aperçu sur la meilleure répartition des fissures, ce qui montre qu'après la formation d'une fissure, à travers une ductilité plus significative, d'autres naissent dans sa proximité (figures I.10 et I.11) [13].

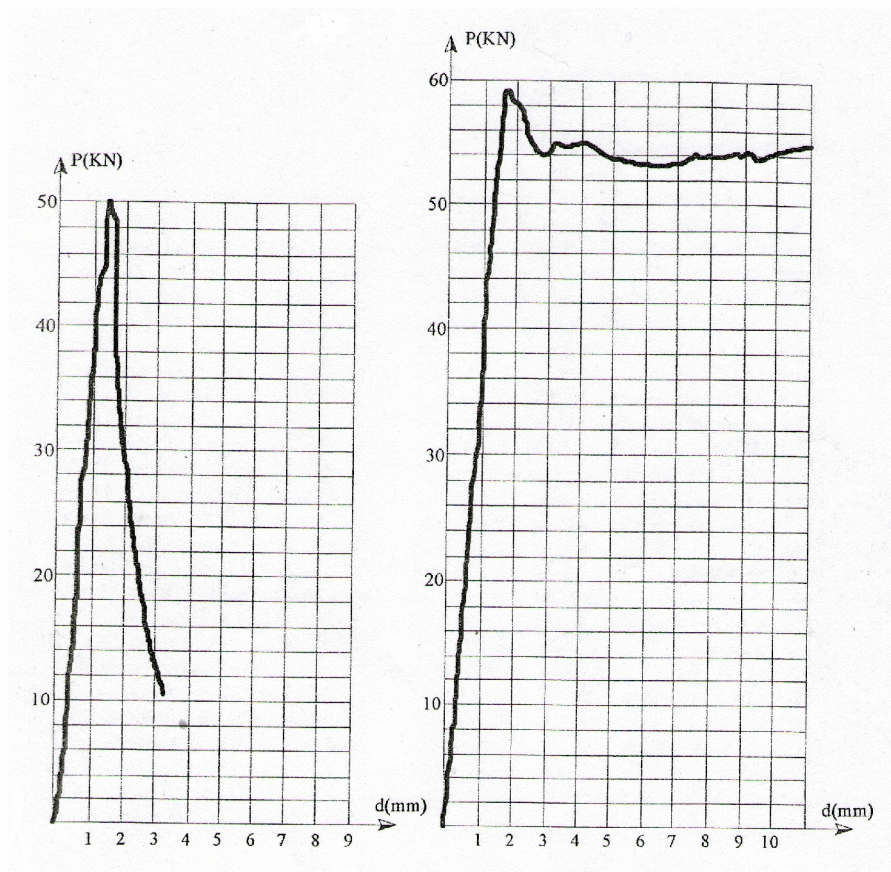


Figure I.10 Diagramme d'essai d'une dalle
Conventionnelle sans renforcement
par fibres d'acier [13].

Figure I.11 Diagramme d'essai d'une dalle de béton,
sous charge ponctuelle renforcée de 20 kg/m^3
de fibres d'acier EUROSTEEL [13].

CHANVILLARD [1], suite à des testes d'arrachement faits sur des fibres ondulées a rassemblé les constatations suivantes :

- L'accroissement de l'effort de traction suscite un éclat du béton au niveau de la fissure par suite d'un effet de bord.
- Dès lors, la fibre se trouve dégagée sur une longueur libre, toutefois le décollement se poursuit jusqu'à son arrachement total.
- La fibre, en se déformant, provoque une modification de la courbure de l'ondulation, en contre partie, une plastification de l'acier constitutif est possible, ce qui ne nous empêche pas de penser qu'une augmentation de la résistance du béton à la traction est évidente, vu le gain d'énergie apporté par le phénomène. C'est ce qui justifie la rectitude de la fibre après que l'extraction ait eue lieu et que l'on peut qualifier d'ancrage mécanique (Figure I.12et I.13).

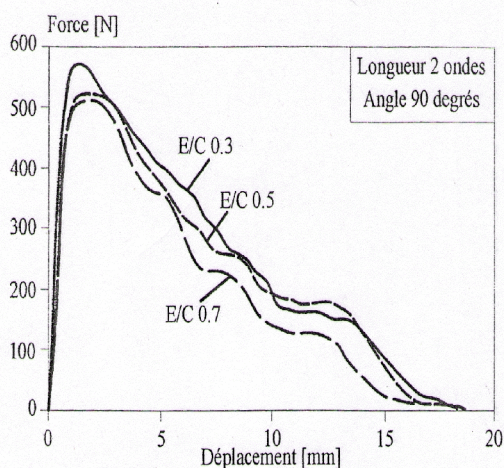


Figure I.12 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90° , 2 ondulations) [1].

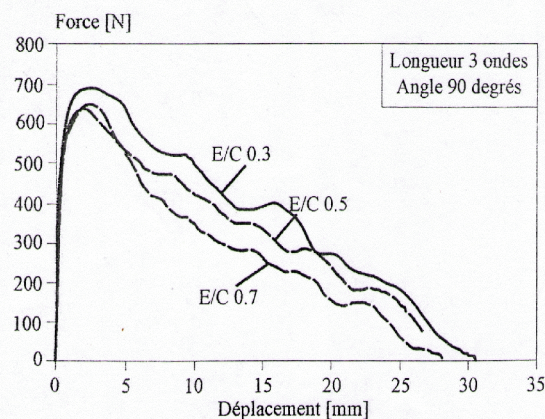


Figure I.13 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90° , 3 ondulations) [1].

I.10 Comportement en flexion et A L'effort TRANCHANT « cisaillement » des bétons armés et des bétons armés de fibres

I.10.1 Introduction :

La recherche sur le comportement du béton vis-à-vis de l'effort tranchant « cisaillement » est une question d'actualité. Des efforts remarquables ont été consacrés pour la compréhension physique de ce processus de dégradation affectant les ouvrages ainsi que la capacité à décrire ce phénomène avec des modèles numériques. Plusieurs chercheurs, dans le monde du Génie-civil, ne cessent de s'impliquer dans cette vision, afin de proposer des solutions appropriées, dans le but d'assurer un bon fonctionnement de nos structures. Au fait, le contrôle de la fissuration, engendrée par cisaillement, d'un élément en béton armé entre dans le cadre de la vérification de son fonctionnement normal de l'ouvrage. Les divers règlements et recommandations ont adopté des méthodes de dimensionnement et de vérification imposant des limites de fissuration dépendant de la nature de l'ouvrage et du niveau d'exigence requis.

Cette partie présente une étude bibliographique, des essais expérimentales réalisées par des chercheurs à fin de suivre le comportement en flexion et à l'effort tranchant « cisaillement » des bétons armés de fibres.

I.10.2 Essais de l'université de São Paulo Brazil

Cette étude expérimentale a été menée à l'université de São Paulo Brazil par Sydney Furlan Jr et João Bento de Hanai [14] avec pour objectif d'étudier le comportement au cisaillement et en flexion des poutres en béton armé renforcé des fibres d'aciers et de polypropylène ainsi qu'analyser l'influence des fibres sur les performances structurelles par rapport aux différents pourcentages des armatures transversales. Les variables d'essai étaient le type et le volume des fibres. Quatorze poutres de section carrée [100x100x1000] mm³ ont été testées. Ces poutres ont été préparés à partir de sept différentes proportions du mélange (en poids) ont été maintenues constantes (ciment, sable, granulats grossiers) et un rapport Eau/ciment=0,45, un super plastifiant a été utilisé pour la bonne maniabilité du mélange. Les fibres utilisées de type polypropylène ayant une longueur L=42mm et un diamètre $\varnothing=0,05$ mm, par contre les fibres en acier de section rectangulaire (0,20x2,30) mm², avec deux longueurs différentes L=25,4mm et L=38,10mm. Deux poutres ont été préparées pour chaque type de mélange, la seule variation été le pourcentage des armatures transversales (étriers), une série avec étriers (poutres série A) et une série sans étriers (poutres série B). Les caractéristiques des mélanges des poutres testées sont résumées dans le tableau I.1. Des essais de compression ont été réalisés en utilisant des cylindres de section (150x300) mm² pour déterminer les propriétés mécaniques du béton. Les poutres ont été testées en appliquant deux charges égales (essais à quatre points), la figure I.14 illustre la géométrie et le ferrailage (renforcement) des poutres testées pour les deux séries (série A et B). Les poutres ont été instrumentées avec des jauges électriques dans la zone de compression du béton (symbole C), sur les armatures transversales (symbole A). En plus des jauges de (LVDT) ont été installées sur les supports et au milieu de la poutre, à fin de mesurer les déformations (déplacements) des poutres, la figure I.15 montre la disposition et les nombres de jauges installées.

Mélange du béton	poutres	Type de fibres	Volume de fibres V_f (%)	Super plastifiant (%)
1	P1A/P1B	-	-	-
2	P2A/P2B	Polypropylène	0,5	1,0
3	P3A/P3B	Acier 25,4mm	1,0	1,0
4	P4A/P4B	Acier 25,4mm	2,0	1,0
5	P5A/P5B	Acier 25,4mm	1,0	1,0
6	P6A/P6B	Acier 25,4mm	2,0	1,0
7	P7A/P7B	Acier 25,4mm	0,5	1,0

Tableau I.1 Caractéristiques du mélange des poutres testées [14].

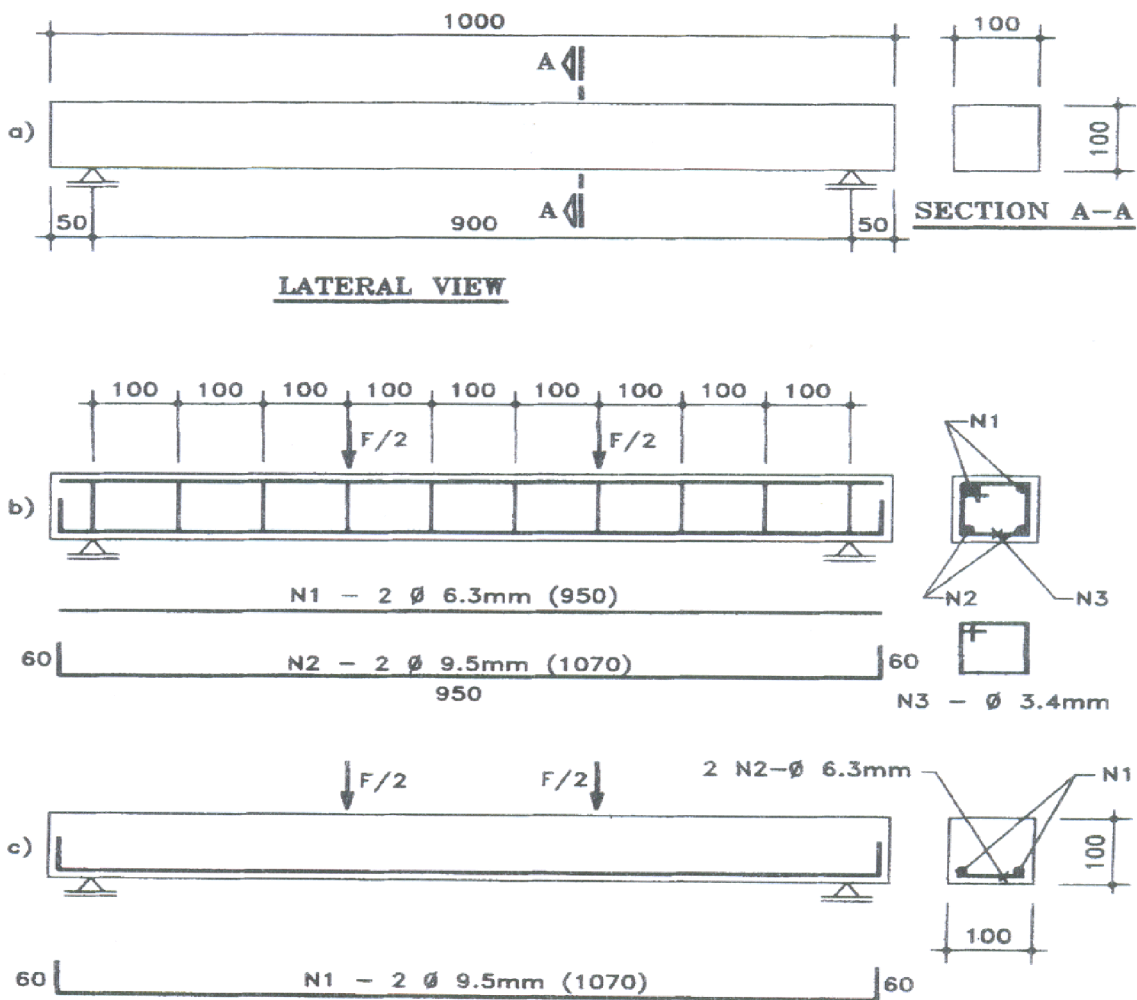


Figure I.14 (a) Géométrie, (b) Renforcement des poutres série A, (c) Renforcement des poutres série B [14].

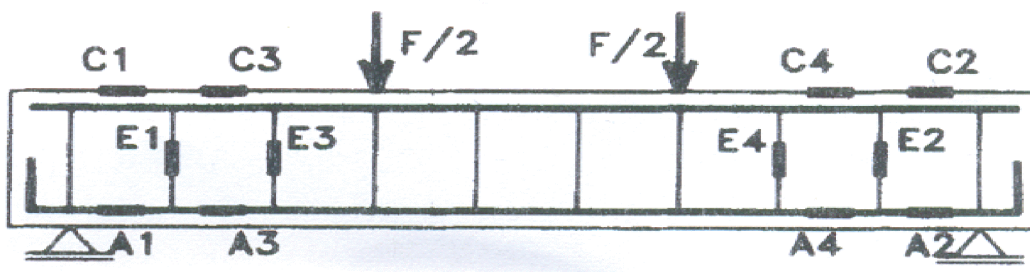


Figure I.15 Position et nombres de jauges installées [14].

Les vues des poutres (série A et B) après les testes sont présentés par les figures I.16 et I.17.



Figure I.16 Vue des poutres série A après les essais [14].

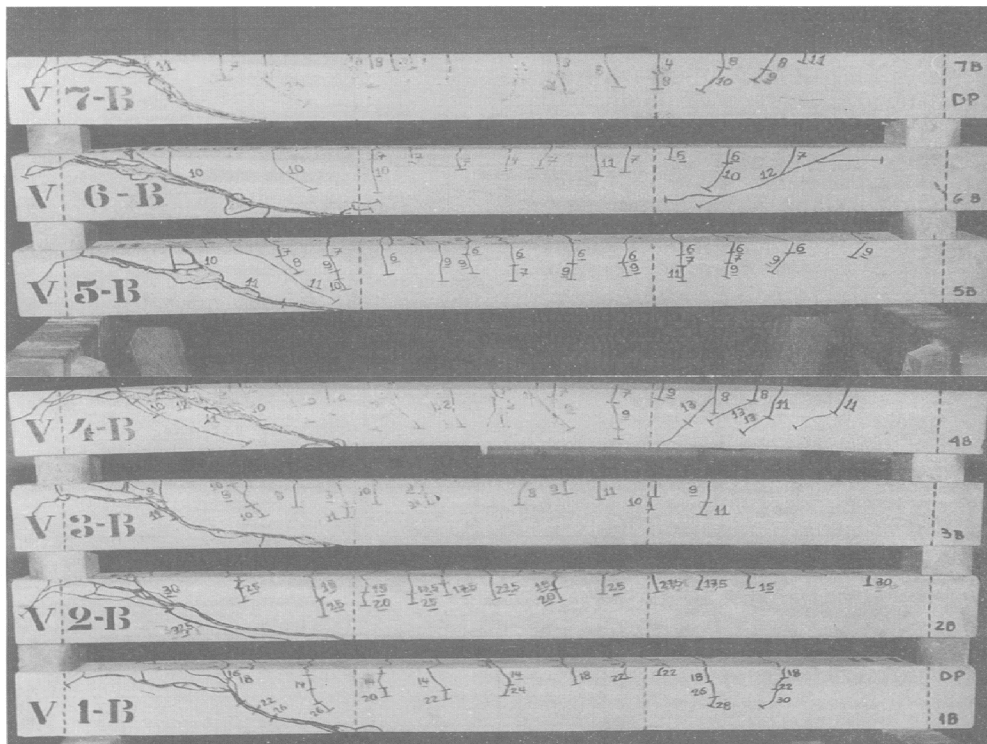


Figure I.17 Vue des poutres série B après les essais [14].

Les courbes qui présentent la force en fonction de la flèche des poutres (série A et B) testées sont présentées par les figures I.18 et I.19.

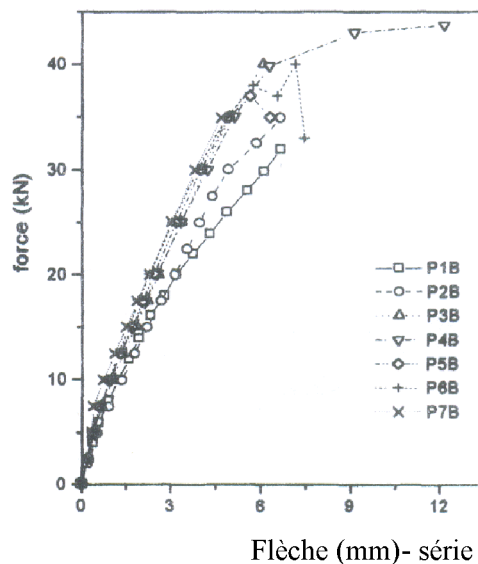
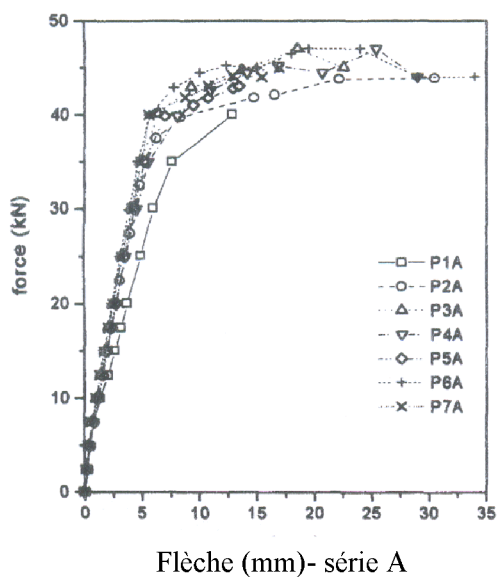


Figure I.18 Force- Flèche des poutres série A [14]. Figure I.19 Force- Flèche des poutres série B [14].

La figure I.20 montre la progression des déformations dans les étriers aux points (E3-E4) des poutres de la (série A) testées.

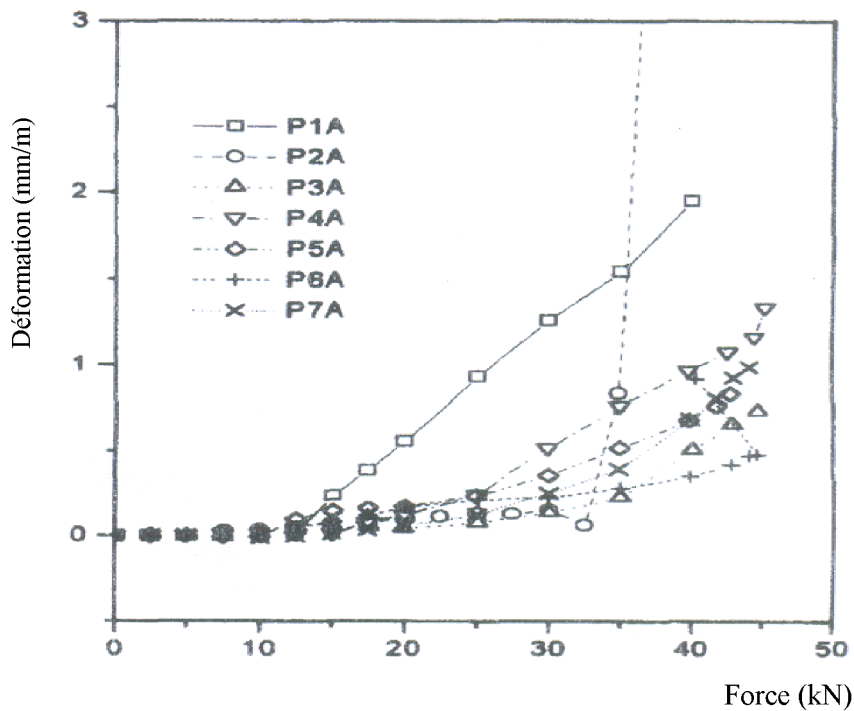


Figure I.20 Déformations dans les étriers aux points E3-E4 [14].

La figure I.21 montre la progression des déformations dans les armatures longitudinales aux points (A3-A4) des poutres (série A) testées.

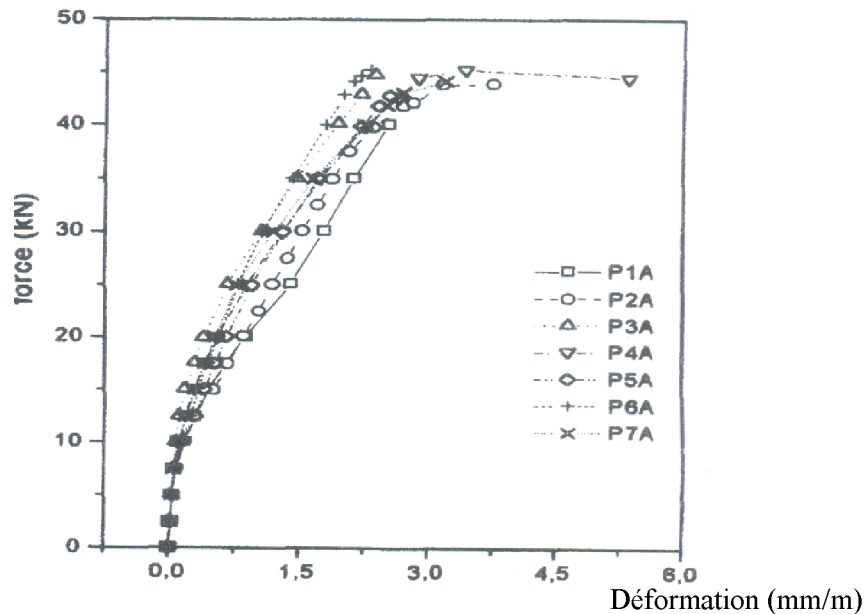


Figure I.21 Déformations dans les armatures longitudinales aux points A3-A4 [14].

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par Sydney Furlan Jr et João Bento de Hanai [14] sont :

- L'ajout des fibres diminue l'ouvrabilité du béton, en particulier dans le cas des fibres de polypropylène.
- L'ajout des fibres d'acier a donné une légère augmentation de la résistance à la traction, dans le cas des fibres longues et le module d'élasticité, en particulier dans le cas des fibres courtes.
- La propagation des fissures du béton renforcé de fibres a été relativement lente et, par conséquent les déformations (flèches) ont été réduites.
- La ductilité augmente seulement de manière significative pour les poutres sans étriers et avec plus de 2% des fibres d'acier, et pour les poutres avec 2% de fibres d'acier courtes, la même chose pour les poutres sans fibres et avec des étriers prouvant la faisabilité du remplacement des étriers par les fibres.
- L'ajout de fibres a augmenté la résistance au cisaillement, la rupture était plus ductile dans pratiquement toutes les poutres renforcées de fibres.
- Les résultats obtenus montrent qu'il y a des différences dans la façon dont les fibres d'acier et polypropylène agissent en cisaillement, et cela est dû à la différence des modules d'élasticité.

I.10.3 Essais de l'université de South Korea

Cette étude expérimentale et théorique a été menée à l'université South Korea par D.H Lim et B.H.Oh [15] avec pour objectif d'étudier :

- 1- Le comportement mécanique au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier.
- 2- La possibilité de remplacer les armatures transversales (étriers) par des fibres d'acier.
- 3- La possibilité de faire un mélange (étriers+ fibres) pour améliorer la ductilité au cisaillement et limiter les ouvertures des fissures.

Un programme d'essais portant sur trois séries de trois poutres (un total de neuf poutres) a été réalisé et testé à l'université de SOUTH KOREA par D.H. Lim et B.H.Oh [15].

Toutes les poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 100 mm, une hauteur de 180mm et une longueur $L=1300\text{mm}$ (voir figure I.33). Les variables importantes d'essai étaient les fractions volumiques des fibres en acier et le pourcentage des armatures transversales (étriers). Le pourcentage des armatures transversales (étriers) a été varié entre 0% à 100%, les fractions volumiques des fibres ont été variées de 0% à 2%, les fibres utilisées ont un diamètre $\varnothing=0,7\text{mm}$ et une longueur de $L=42\text{mm}$, les armatures longitudinales utilisées ayant un diamètre $\varnothing=16\text{ mm}$ pour les armatures tendues et un diamètre $\varnothing=10\text{ mm}$ pour les armatures comprimées, le diamètre des armatures transversales (étriers) est de $\varnothing=6\text{ mm}$, les caractéristiques des aciers et les fibres utilisées sont présentées dans le tableau I.2. Les poutres ont été testées sous applications de deux charges concentrées égales (essai à quatre points), trois comparateurs d'une précision de 0,01 mm ont été utilisés pour mesurer les déformations à plusieurs endroits. Des jauges ont été attachées sur les barres longitudinales et les étriers afin de mesurer les déplacements (figure I.22). Les charges ont été appliquées, étape par étape jusqu'à la rupture, l'incrément de charge utilisé est de 0,5 tonne.

	Limite d'élasticité [MPa]	Résistance à la traction [MPa]	Module de Young [MPa]
Barres d'acier	420	545	2×10^5
Etriers	359	534	2×10^5
Fibres d'acier	1303	1784	2×10^5

Tableau I.2 Caractéristiques des aciers et fibres utilisées [15].

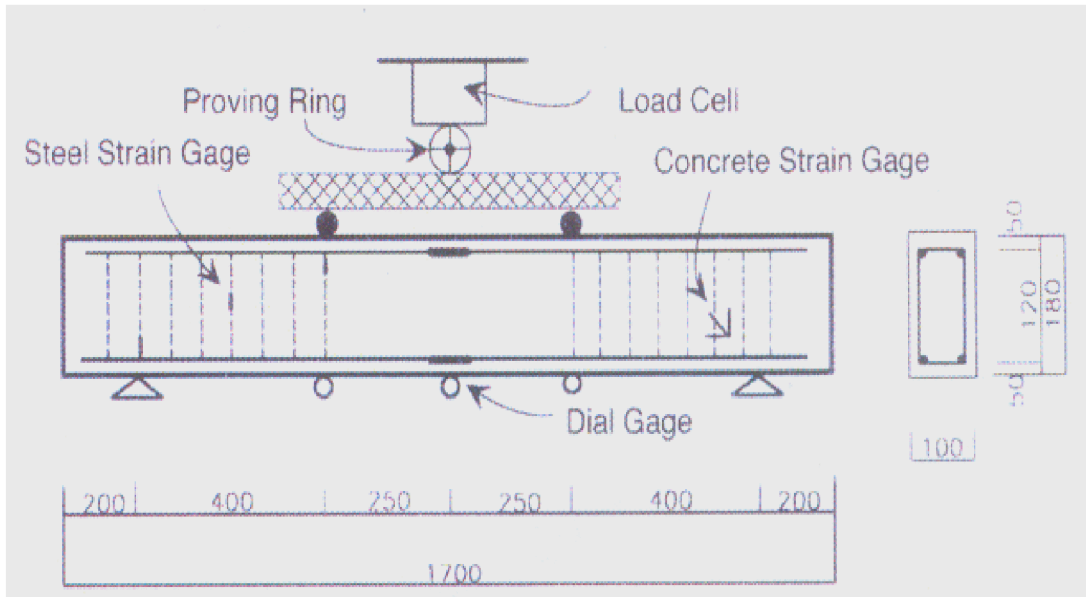


Figure I.22 Dispositif d'essai des poutres testées [15].

Les résultats obtenus à la fin des tests sont présentés sous forme de graphes comme suit :

La figure I.23 montre la comparaison des différentes résistances relative (compression, flexion, traction) en fonction des teneurs en fibres (%) pour les poutres testées.

Résistance relative

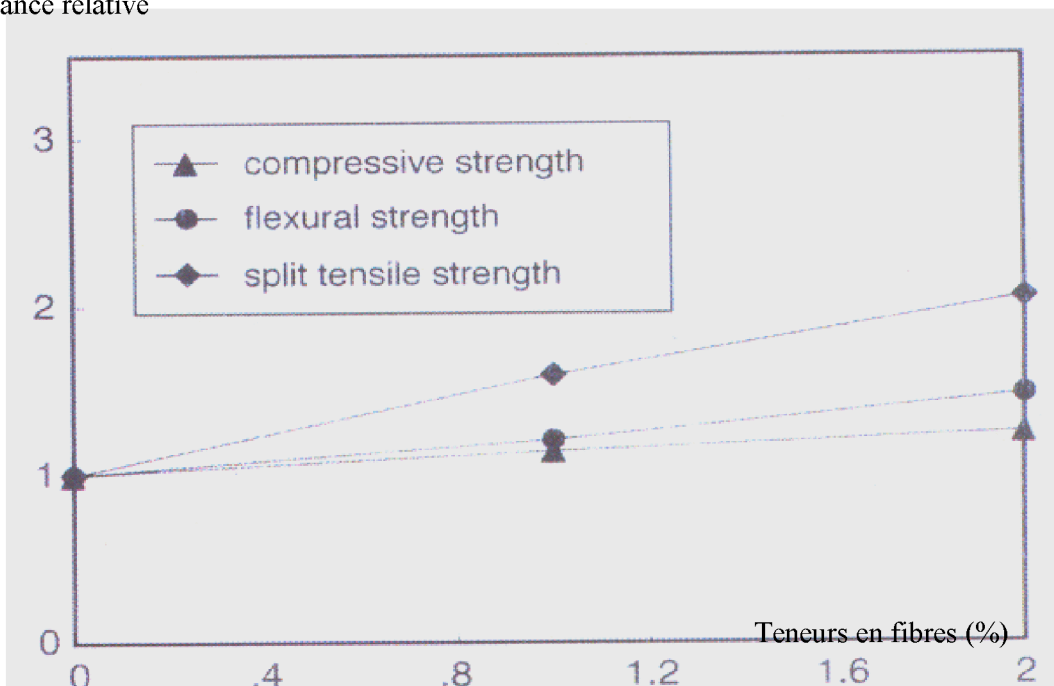


Figure I.23 Comparaison des différentes résistances relatives en fonction des teneurs en fibres [15].

La figure I.24 montre le mode de fissuration pour les différentes poutres testées.



Figure I.24 Mode de fissuration pour les différentes poutres testées [14].

Les courbes charge-flèche pour les poutres testées avec et sans armatures transversales (étriers) sont présentées par les figures I.25 et I.26.

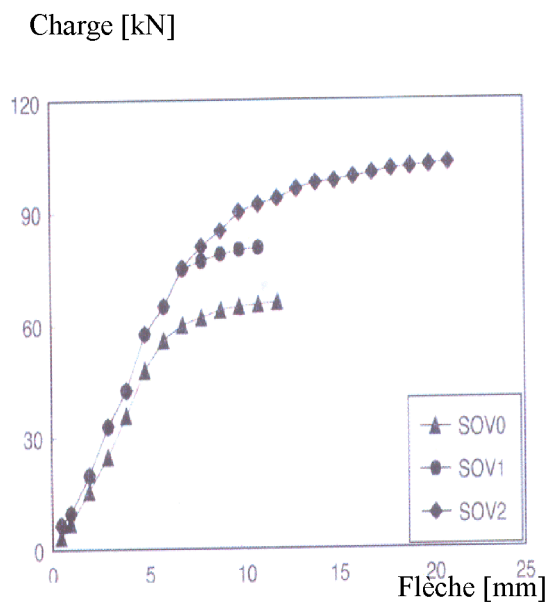


Figure I.25 Courbe charge-flèche pour les Poutres sans étriers [15].

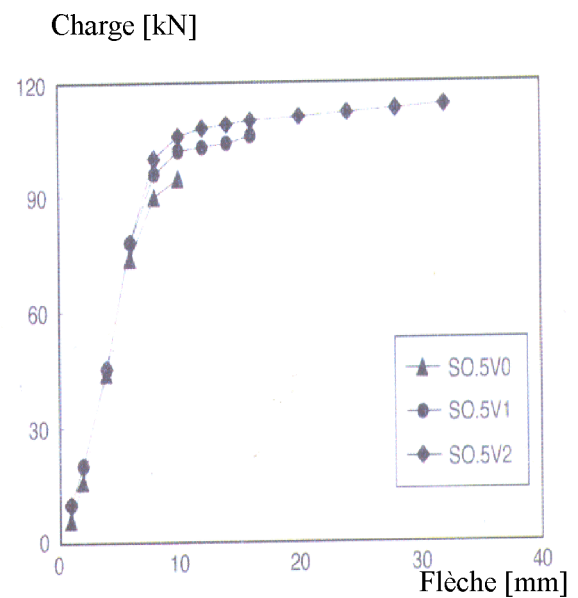


Figure I.26 Courbe charge-flèche pour les poutres avec 50% des étriers conventionnels [15].

La courbe résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%), ainsi que la courbe résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) pour les poutres testées avec et sans armatures transversales (étriers) sont présentées par les figures I.27 et I.28.

Résistance à la fissuration au cisaillement [MPa]

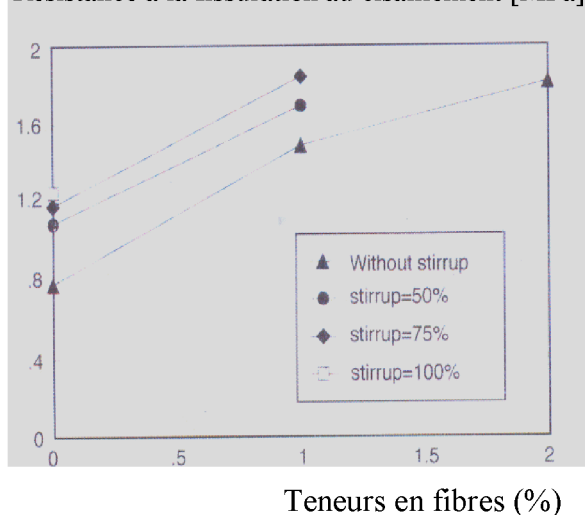


Figure I.27 Résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].

Résistance ultime au cisaillement [MPa]

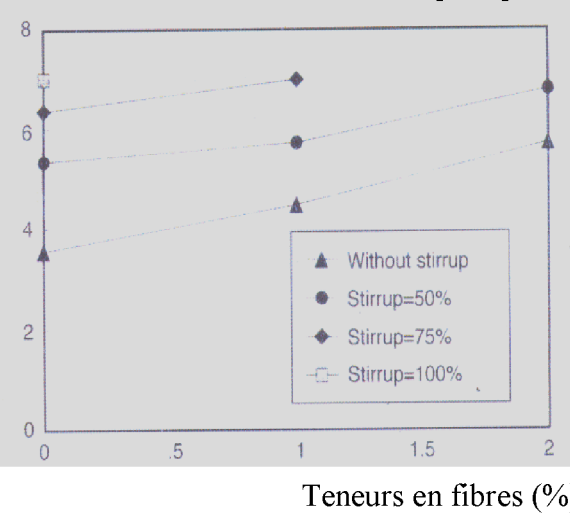


Figure I.28 Résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].

D'après cette étude expérimentale et théorique menée par LIM D.H ET OH B.H [15] sur le comportement au cisaillement des Poutres en béton armé avec fibres d'acier, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1- L'ajout des fibres d'acier augmente la résistance à la compression, flexion et la traction
- 2- Le mode de fissuration change au cisaillement et en flexion lorsque la fraction volumique des fibres d'aciers utilisée dépasse un certain pourcentage, soit environ de 1% dans cette étude. Cela signifie que l'ajout des fibres augmente la capacité de résistance au cisaillement considérablement.
- 3- La résistance de la fissuration au cisaillement à augmente considérablement environ deux fois, en raison de l'ajout des fibres d'acier lorsque le pourcentage en fibre utilisée est de 1%. Ainsi, l'ajout des fibres limite les ouvertures des fissures au cisaillement.
- 4- L'utilisation des teneurs en fibres peut réduire le nombre d'étriers pour résister au cisaillement et une combinaison de fibres et étriers peuvent satisfaire aux exigences de résistance et ductilité.

5- Une méthode d'analyse pour prédire la résistance au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier est présentée. La méthode permettra l'analyse du comportement au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier.

I.10.4 Travaux de T.M. Roberts et N. L. H

Cette étude expérimentale a été menée par T.L. Roberts et N .L. Ho [16] avec pour objectif d'étudier la rupture par cisaillement des poutres de grande hauteur en béton armé renforcées de fibres d'acier. Trois séries de poutres ont été testées expérimentalement, ces poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 50mm et une hauteur H=200mm, un seul type de fibres à été utilisée « fibres Duoform » dans cette expérimentale, trois teneurs en fibres ont été utilisées (0%, 3% et 4,5%) , les dimensions de ces fibres utilisées on un diamètre $\varnothing=0,38\text{mm}$ et une longueur $l=38\text{mm}$. La composition du béton utilisée est constituée du (ciment, sable, granulats et eau), le ciment utilisée et de type portland, le diamètre maximale des granulats utilisées et de 10mm. Le même jour du coulage des poutres, des éprouvettes cylindriques de dimensions [150x300]mm, ont été coulées on utilisant le même béton, à fin de déterminer la résistance du béton à la compression. Après coulages les poutres et cylindres ces derniers sont stockés dans de eau pendant 28 jours à une température de 20^0 , le détail des spécimens des poutres testées sont données dans le Tableau I.3.

poutres	Largeur de poutre « b » (mm)	hauteur Utile « d » (mm)	Langueur (mm)	endroit de Cisaillement « a » (mm)	a/d	Teneurs en fibres en « % »
PCB1	50	170	1000	410	24	0
F3 0B1	50	170	1000	410	24	3,0
F4 5B1	50	170	1000	410	24	4,5
PCB2	50	170	725	273	16	0
F3 0B2	50	170	725	273	16	3,0
F4 5B2	50	170	725	273	16	4,5
PCB3	50	170	455	137	08	0
F3 0B3	50	170	455	137	08	3,0
F4 5B3	50	170	455	137	08	4,5

Tableau I.3 Détails des spécimens des poutres testées [16].

Toutes les poutres et cylindres ont été testées après 31 jours, les cylindres en compression par contre les poutres en flexion « essai à trois points », la charge appliqué est reparti à travers deux plaques de largeur de 50 mm, le détail de chargement des poutres testés est présenté par la figure I.29. La vitesse de chargement à été gardé constante 0,5 mm/min à fin que les fissures pourrait être détectés et visualisées.

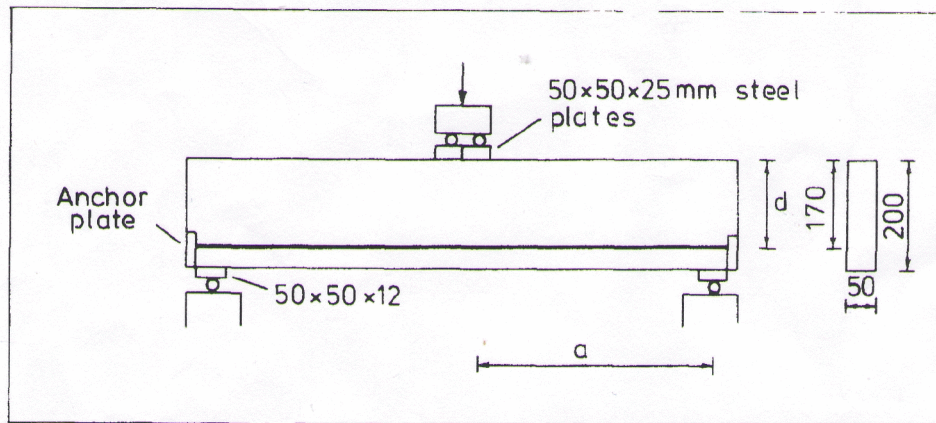


Figure I.29 Détails de chargement des poutres testées [16] .

Après les testes des différentes poutres, le mode de fissuration des poutres testées pour les différents rapports (a/d) sont représentés par les figures I.30, I.31 et I.32.

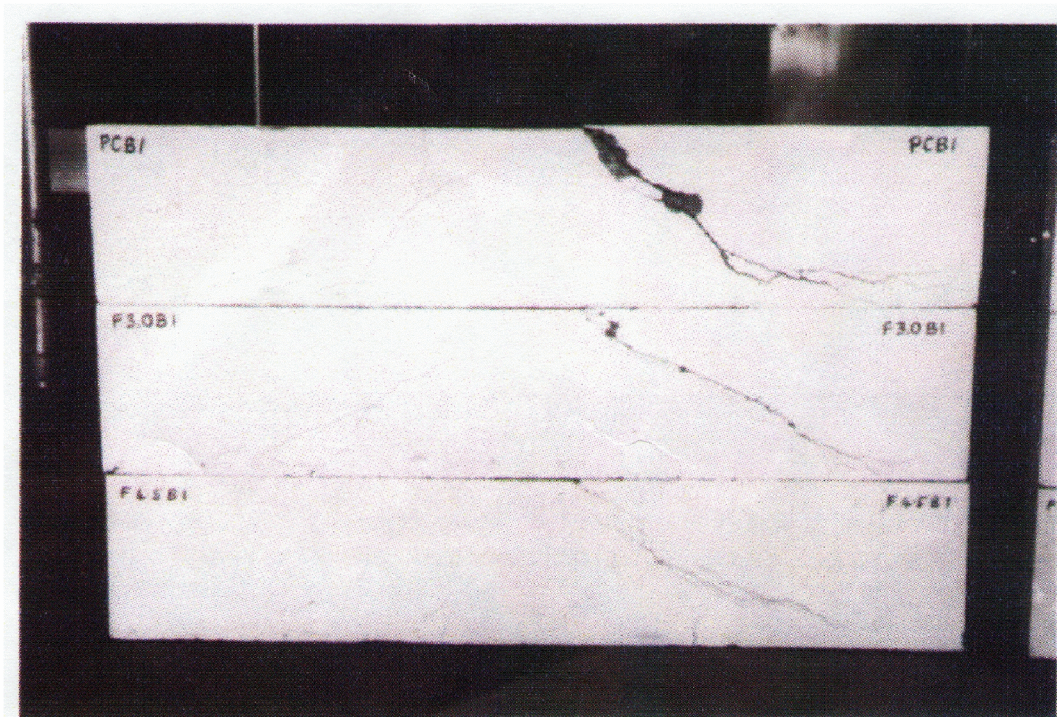


Figure I.30 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=24$ [16].

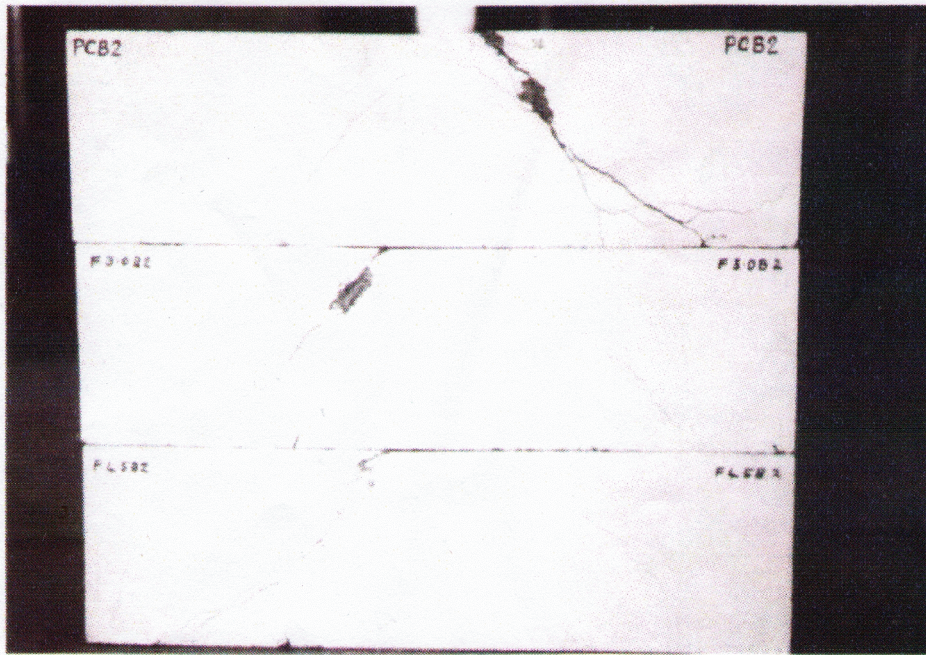


Figure I.31 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=16$ [16].

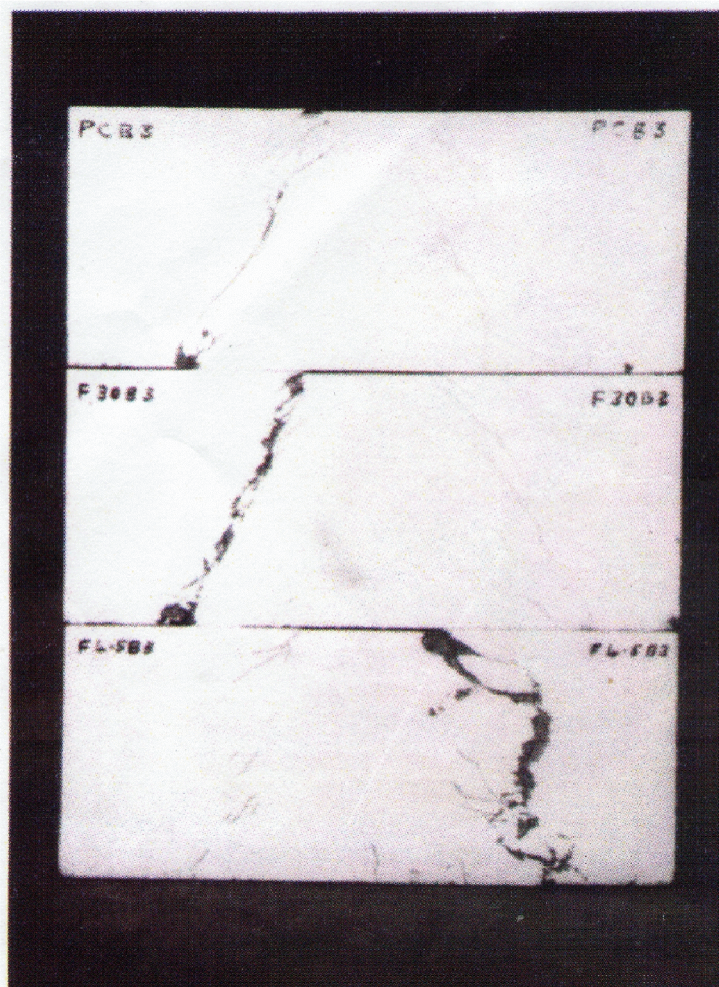


Figure I.32 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=8$ [16].

La superposition des courbes de la figure I.33, présente le rapport entre le moment max théorique M_u sur le moment max à la rupture M_f (M_u/M_f) en fonction du rapport à (a/d).

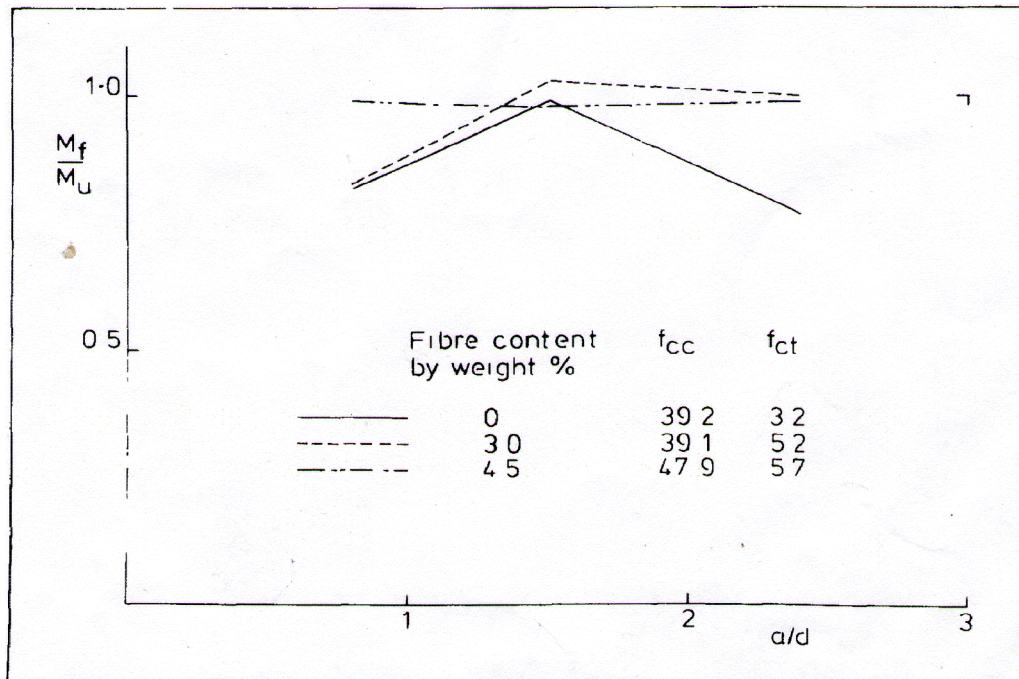


Figure I.33 Rapport du moment théorique/ moment à la rupture en fonction de rapport à a/d [16].

Avec :

M_u : Moment max théorique.

M_f : Moment max à la rupture.

f_{cc} : Résistance à la compression du béton testé.

f_{ct} : Résistance à la traction du béton testé.

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par T.L. Roberts et N.L. Ho [16] a fin d'étudié le comportement à l'effort tranchant (rupture par cisaillement) des poutres de grande hauteur en béton armé renforcées par des fibres d'acier sont :

- 1- La fissuration au cisaillement en particulier dans le cas des poutres de grandes hauteur ce produit avant la résistance ultime à la flexion.
- 2- L'inclusion des fibres d'acier dans le béton augmente la capacité ultime à la flexion et aussi la résistance à la rupture par cisaillement.
- 3- Les résultats obtenus par cette étude expérimentale pour le cas des poutres de grande

hauteur appuyé sur les conclusions de la référence [17], montrent que pour un rapport a/d important, la fissuration par cisaillement peut être évitée par l'inclusion des fibres à la place des armatures.

4- Les résultats obtenus aussi montrent que les poutres de grande hauteur résistent bien à l'effort tranchant « cisaillement » principalement par l'action arcade.

5- Les résultats obtenus aussi par cette étude appuyée sur les conclusions des hauteurs des références [18,19] que les fissures diagonales ne peuvent pas se produire jusqu'à ce qu'il soit précipité par d'autres procédés tels que le relâchement des armatures à la traction ou fissures à la compression du béton sous la charge appliquée.

I.10.5 Essais de l'université North Carolina state Etats-Unis (USA)

Cette étude expérimentale a été menée à l'université de l'état CAROLINE du nord, Etats-Unis (USA) [20] avec pour objectif d'étudier la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger à résistance normale (ordinaire) et à haute résistance, (15) poutres en béton armé ordinaire et de haute résistance avec et sans armatures transversales ont été testées expérimentalement. Toutes les poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 127 mm, une hauteur de 254mm (figure I.34). Les variables d'essai étaient la résistance du béton à la compression (f_c), le rapport entre le point d'application de l'effort et la hauteur utile (a/d) qui varie de 1 à 4, ainsi que la quantité des armatures transversales (étriers). La résistance à la compression du béton varie entre 30,5MPa et 89,3MPa. Le pourcentage des armatures transversales a été varié entre 0 et 0,784% (tableau I.4). La composition du béton léger (normale) et de haute résistance est constituée du ciment portland type1, de sable ayant un module de finesse de 2,62, le diamètre maximale des granulats utilisées est $\varnothing=12,5$ mm et d'eau. Pour assurer une bonne maniabilité du béton un adjuvant (super plastifiant) a été utilisée. Les armatures longitudinales et transversales utilisées ayant un diamètre $\varnothing =8$ mm, la limite d'élasticité moyenne obtenue sur trois essais, et de l'ordre de 421MPa pour les armatures longitudinales et de 324MPa pour les armatures transversales (étriers).

Des cylindres de « contrôle » ont été testés périodiquement à fin de vérifier si le béton atteint la contrainte de compression désirée. Le jour des essais sur les poutres, trois (03) cylindres de « contrôle » ont été testés en compression pour déterminer la résistance du béton.

Le dispositif d'essai utilisées pour le teste des poutres et les cylindres est montré par la figure I.35, des éléments raidisseurs ont été ajoutés à une installation d'essai existants, c'est des supports

rigides avec une poutre d'acier croisée rigides ont été utilisées pour agir comme élément raidisseur et d'absorption d'énergie dans le dispositif d'essais, ainsi que des vérins hydraulique ultra- haute résistance ont été utilisées pour initier le contact des supports rigides avec la poutre en acier croisée. Un capteur (LVDT) et des jauges ont été montés afin de mesurer les déplacements (déformations) verticales à mi-portée des poutres et les déformations dans les armatures transversales (étriers).

N° de la poutre	Largeur de poutre (mm)	hauteur Utile (mm)	a/d	Age de Test (jours)	Contrainte du béton testé (MPa)	Armatures tendues A_s (mm ²)	Armatures Comprimées A'_s (mm ²)	Espacement des étriers (mm)	Armatures transversales (%)
LNN-1	127	216	1	143	33,79	258	0	/	0
LNN-2	127	216	2	136	44,83	258	0	/	0
LNN-3	127	216	3	150	40,34	258	0	/	0
LNW-1	127	216	1	151	30,55	567	258	101	0,49
LNW-2	127	216	2	133	38,97	567	258	101	0,49
LNW-3	127	216	3	142	44,62	567	258	101	0,49
LHN-1	127	216	1	107	86,90	567	0	/	0
LHN-2	127	216	2	76	85,45	567	0	/	0
LHN-3	127	216	3	103	89,17	567	0	/	0
LHW-1	127	198	1	85	82,34	1135	258	99	0,51
LHW-2	127	198	2	82	85,79	1135	258	99	0,51
LHW-3	127	198	3	76	89,31	1135	258	99	0,51
LHW-3a	127	198	3	85	88,21	1135	258	76	0,65
LHW-3b	127	198	3	72	86,97	1135	258	63	0,78
LHW-4	127	198	4	66	82,97	1135	258	99	0,51

Tableau I.4 Caractéristiques des poutres testées [20].

Avec :

LNN-1

L : Béton léger.

N : Résistance normale (ordinaire).

N : Poutres sans armatures transversales (sans étriers).

1 : Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d)

LHW-2

L : Béton léger

H : Haute résistance.

W : Poutres avec armatures transversales (avec étriers).

2 : Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d).

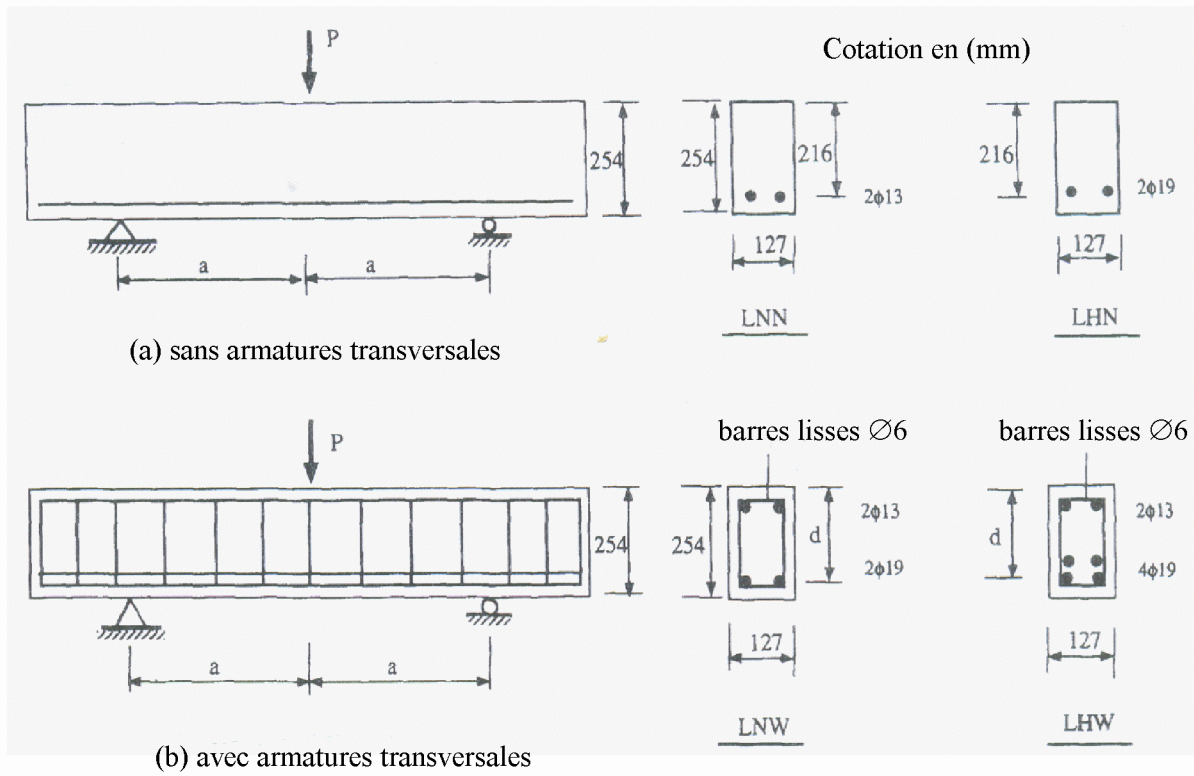


Figure I.34 Description des poutres testées en béton normale et à haute résistance [20].

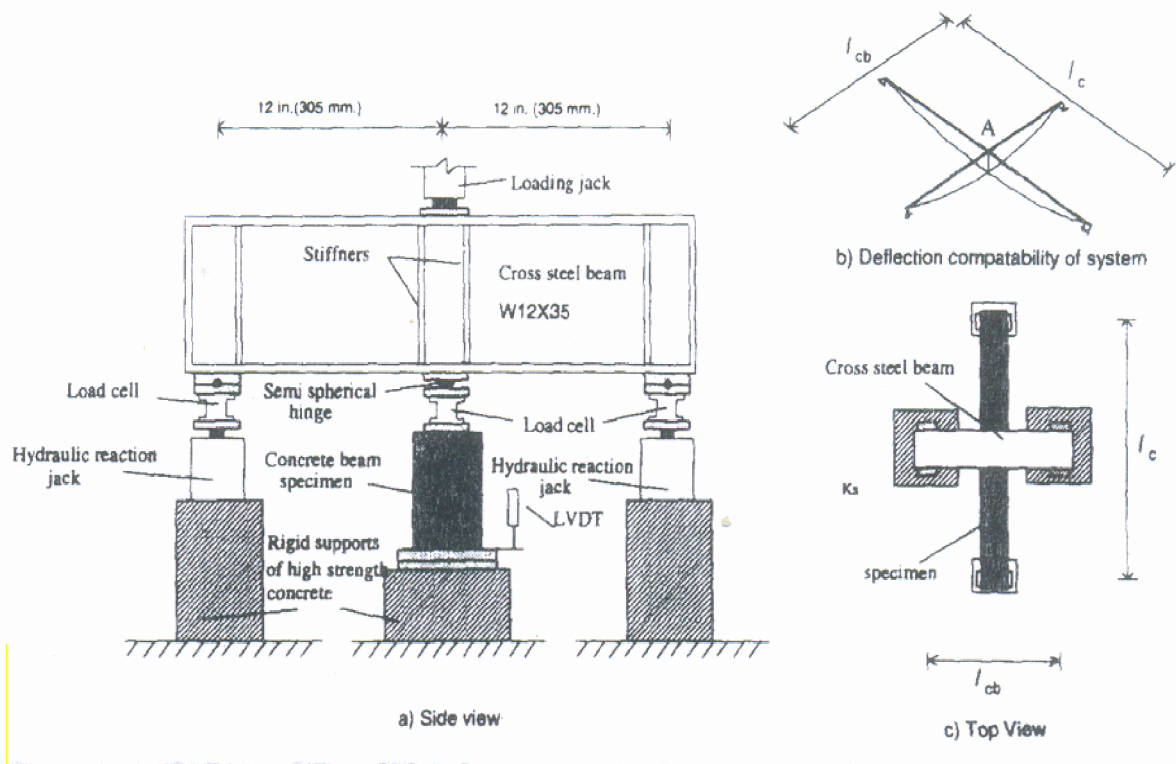


Figure I.35 Dispositif d'essais utilisée [20].

Les résultats présentés dans le Tableau I.5, comprennent les valeurs observées des charges (ultime) et le type de rupture des poutres testées en béton armé normale et à haute résistance.

N° de la poutre	a/d	f_c (MPa)	Charge Ultime P_u (kN)	Type de rupture
LNN-1	1	33,79	211,72	Compression- diagonale
LNN-2	2	44,83	66,75	Cisaillement- compression
LNN-3	3	40,34	45,30	Traction- diagonale
LNW-1	1	30,55	299,83	Compression- diagonale
LNW-2	2	38,97	168,38	Cisaillement- compression
LNW-3	3	44,62	126,60	Cisaillement- compression
LHN-1	1	86,90	377,17	Compression- diagonale
LHN-2	2	85,45	170,87	Cisaillement- compression
LHN-3	3	89,17	86,82	Traction- diagonale
LHW-1	1	82,34	554,95	Compression- diagonale
LHW-2	2	85,79	270,95	Cisaillement- compression
LHW-3	3	89,31	184,93	Cisaillement- compression
LHW-3a	3	88,21	214,13	Cisaillement- compression
LHW-3b	3	86,97	241,45	Cisaillement- compression
LHW-4	4	82,97	189,70	Cisaillement- compression

Tableau I.5 Charges (ultime) et type de rupture des poutres testées [20].

Les courbes qui présentent la charge en fonction de la flèche à mi-portée pour les 15 poutres testées en béton armé léger normale et à haute résistance, pour les différents rapports (a/d) et pour les différents pourcentages des armatures transversales (étriers) ainsi que pour l'effet de la résistance du béton à la compression sont présentées dans les Figures I.36, I.37, I.38.

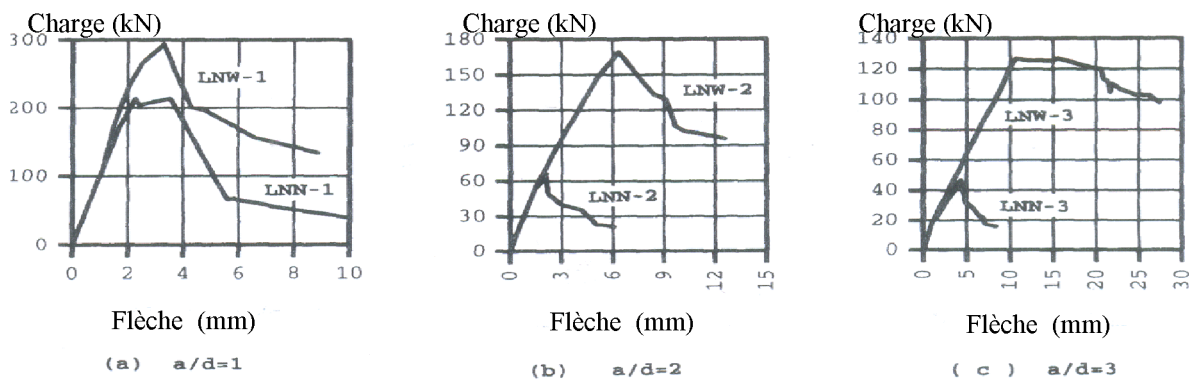


Figure I.36 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé léger avec armatures transversales [20].

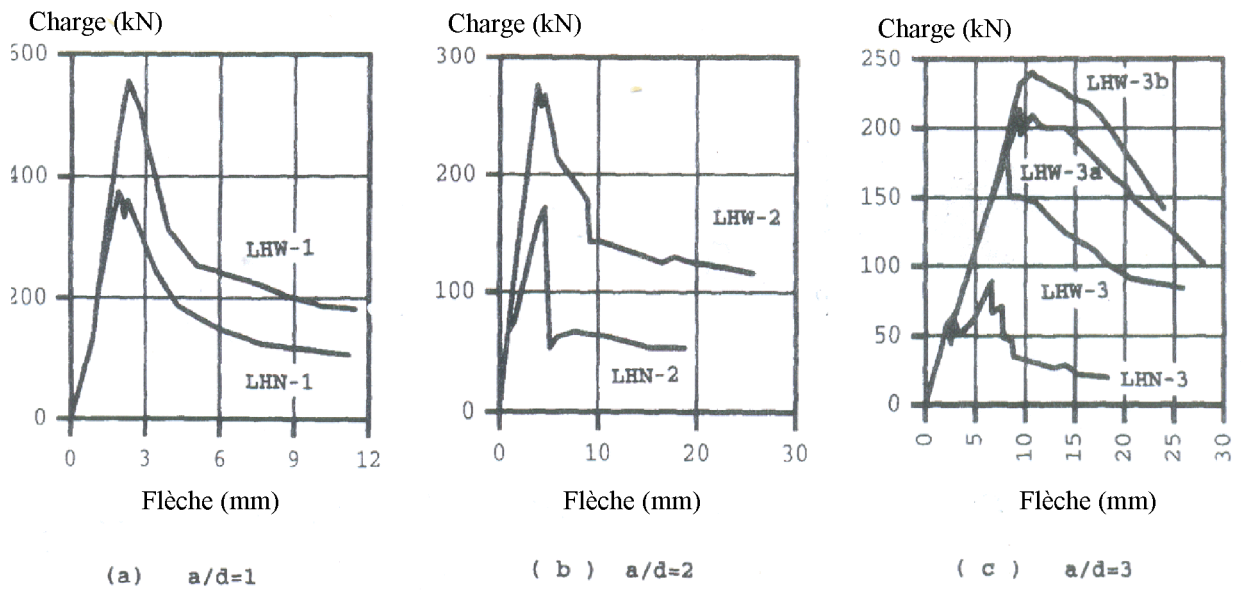


Figure I.37 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé à haute résistance avec armatures transversales [20].

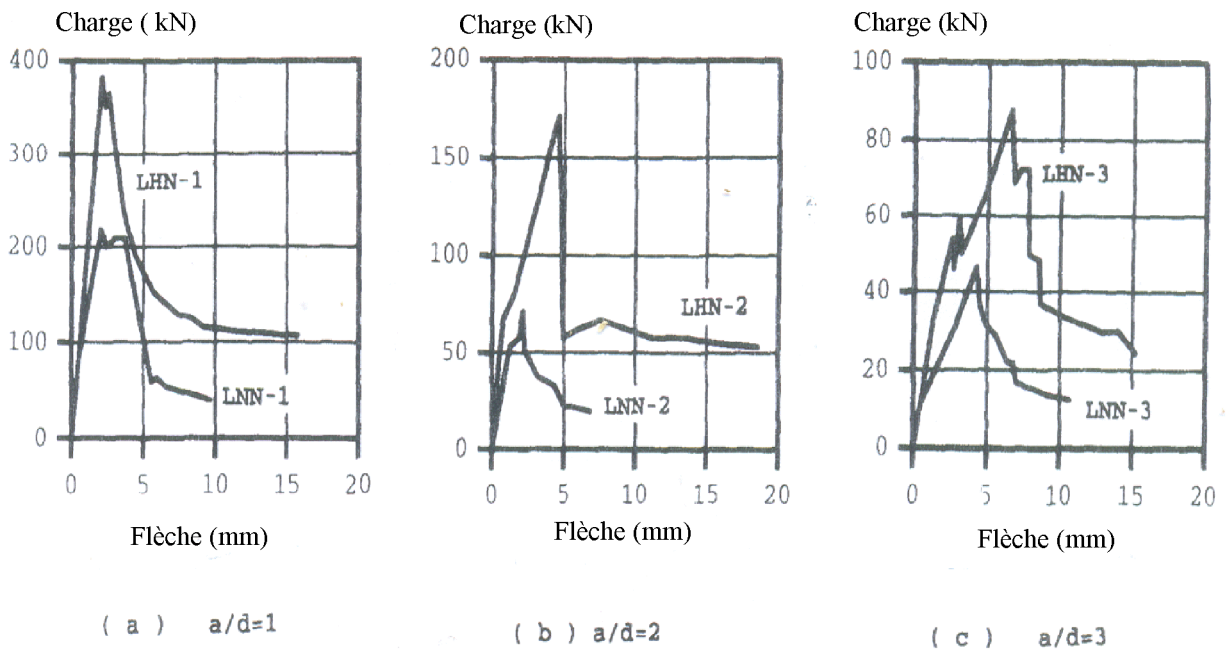
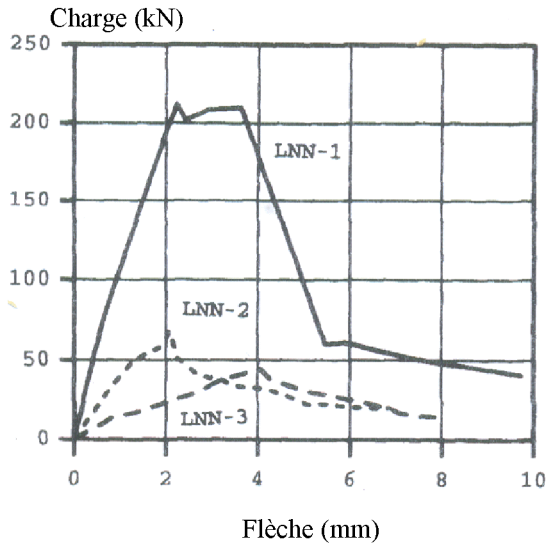
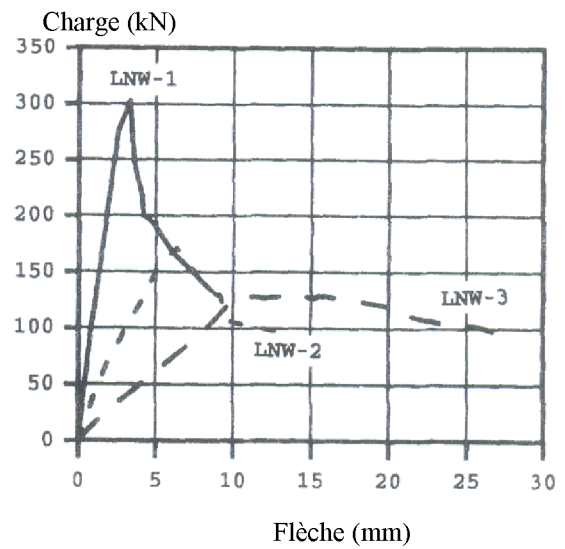


Figure I.38 Effet de la résistance du béton sur la flèche à mi-travée pour un béton léger sans armatures transversales [20].

Les courbes qui présentent l'effet du rapport (a/d) sur le comportement charge- flèche à mi-travée du béton armé léger et à haute résistance, avec et sans armatures transversales sont présentés sur les figures I.39 et I.40.

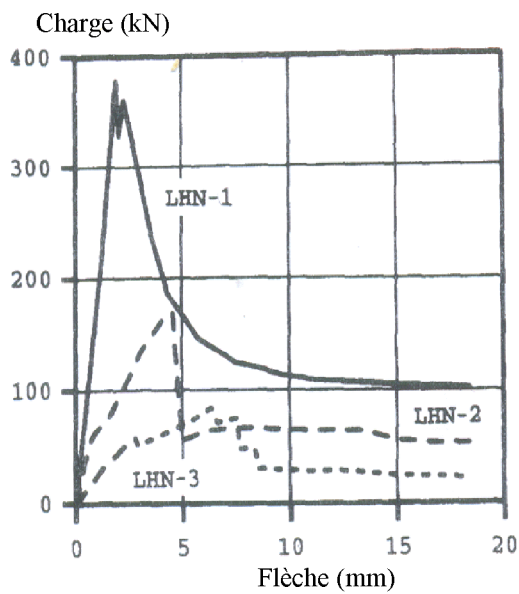


(a) sans armatures transversales.

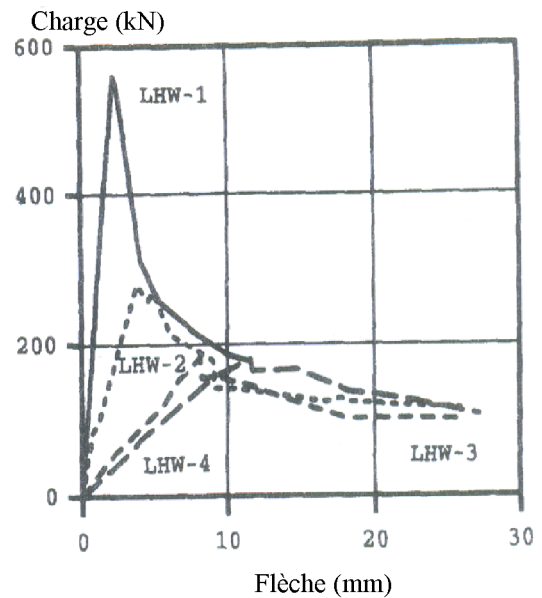


(b) avec armatures transversales.

Figure I.39 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger [20].



(a) sans armatures transversales.



(b) avec armatures transversales.

Figure I.40 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger à haute résistance [20].

La courbe de la figure I.41 montre l'influence de la résistance à la compression du béton léger **sur la ductilité au cisaillement** des poutres avec et sans armatures transversales.

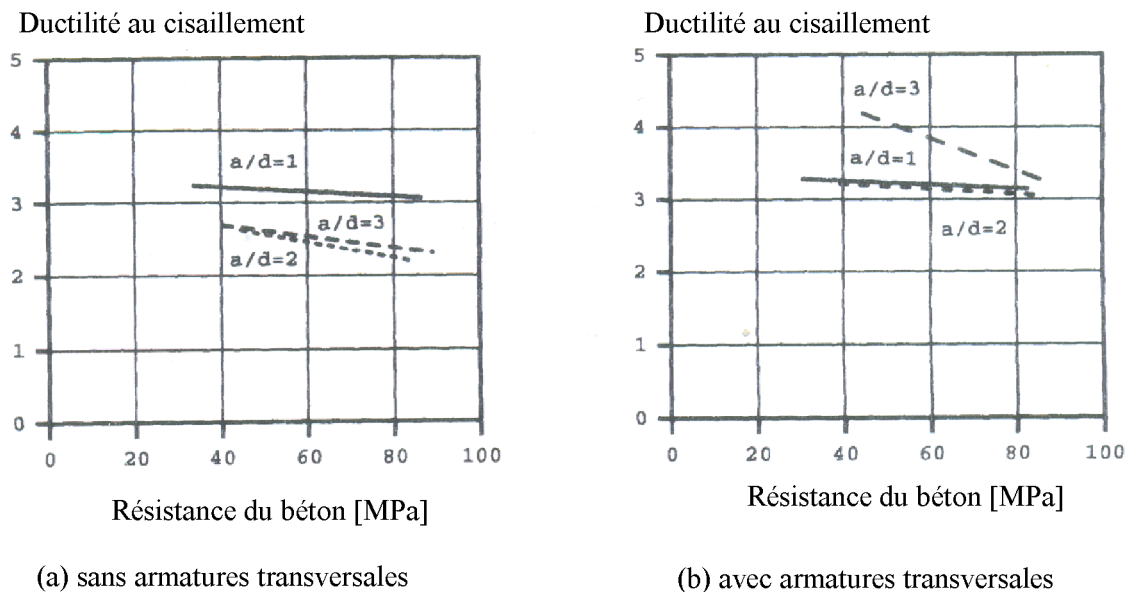


Figure I.41 Effet de la résistance du béton en compression sur la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger [20].

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par S.H. Ahmed, Y. Xie & T. Yu [20] sont :

- 1- Pour les poutres avec ou sans armatures transversales (étriers), la ductilité au cisaillement décroît avec l'augmentation de la résistance du béton à la compression. Donc le cas qui donne une meilleure ductilité au cisaillement sont les poutres avec $a/d=3$ par rapport aux poutres avec $a/d=1$ ou 2.
- 2- L'augmentation du pourcentage des armatures transversales jusqu'à 0,51% a un effet négatif sur l'indice de ductilité au cisaillement pour un rapport $a/d=1$ par rapport aux poutres avec $a/d=2$ et 3, par contre l'augmentation des armatures transversales (étriers) de 0,51% à 0,65% pour les poutres avec un rapport $a/d=3$ l'indice de ductilité augmente de 25%.
- 3- Les caractéristiques de l'indice de ductilité au cisaillement, (post-pic) après le pic de déformations montre que les poutres avec $a/d=2$ présentent des valeurs inférieures par rapport aux poutres avec $a/d=1$ et 3.
- 4- Les poutres en béton armé avec un rapport $a/d=3$ présentent après le pic de déformations une phase plastique, lorsque le pourcentage des armatures transversales fournie était 5 fois plus élevé que le pourcentage minimale exigé par la section 11.1.2.1 du code ACI 318-89.

DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

L'essor que connaissent les bétons armés de fibres est l'impact d'une activité intellectuelle, oeuvrant depuis une quarantaine d'années [21,9,13,1,22,23,24,25,26], pour perfectionner ces matériaux.

Les bétons armés de fibres ont fait preuve de diligence et efficacité, fait qui a contraint les industriels à les utiliser d'une façon extrême, non seulement dans les domaines des dallages industriels, dans celui du béton projeté pour la fabrication des tunnels, et pour la réparation des canalisations d'assainissements, mais aussi dans ceux concernant les chaussées d'autoroutes et de parkings d'aérodromes, L'utilisation de ce matériau, eu égard à sa résistance aux chocs et à l'abrasion, peut être amplifiée pour envahir d'autres domaines.

Dans la présente étude expérimentale, nous nous intéressons à des fibres « locales » pour le renforcement du béton. Ces fibres proviennent des déchets d'usinage des pièces en acier . La première partie de ce travail, consiste en la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres ondulées, sous sollicitations statiques (Traction uni axiale) afin de déterminer la résistance maximale à la rupture de la fibre et à l'arrachement, dans la deuxième partie, des essais partie de cette étude expérimentale, des essais mécaniques (flexion et des essais aux cisaillement" rupture a l'effort tranchant") ont été réalisées.

Deux teneurs en fibres ont été retenue pour cette étude ($w=0.6\%$, $w=0.8\%$) ainsi que le béton témoin (BT " $w=0\%$ ")sans fibres.

CHAPITRE II : CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES ONDULEES EN SPIRALES ISSUES DES DECHETS D'USINAGE DES PIECES EN ACIER.

II.1 Introduction

L'utilisation des fibres pour le renforcement du béton est, notamment en traction, très intense dans le domaine des dallages industriels et dans celui du béton projeté dans le cas des tunnels et la réparation des canalisations de gros diamètre [27] [22].

Cette étude consiste en la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres ondulées (copeaux), sous sollicitations statiques (Traction uni axiale) afin de déterminer la résistance maximale à la rupture de la fibre et à l'arrachement, qui permettra d'améliorer les performances mécaniques en particulier la résistance.

II.2 Etude expérimentale

Les essais consistent à réaliser des essais de traction directe à déformation contrôlée. On donne dans ce qui suit La valeur caractéristique de la contrainte à de rupture, et les courbes obtenues ainsi que les confrontations effectuées.

II.2.1 Géométrie de la fibre et système d'ancrage

Les fibres utilisées proviennent des déchets d'usinage des pièces en acier. Elles sont récupérées à la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI). Leur forme géométrique et ondulée en spirales leur confère un ancrage parfait dans la matrice cimentaire. Une vue de ces copeaux est donnée à la figure II.1. La largeur, diamètre et l'épaisseur des fibres sont données respectivement comme suit : $l=2$ mm, $\phi = 7$ mm et $e=0,5$ mm. Les deux extrémités des copeaux ont été ensimées à l'aide d'une résine de fibres de verre dans un moule spécial a fin d'améliorer leur ancrage dans les mors de serrage de la presse hydraulique lors de l'essai de traction sur la fibre elle-même (voir figure II.2).



Figure II.1 Vue des fibres longues.

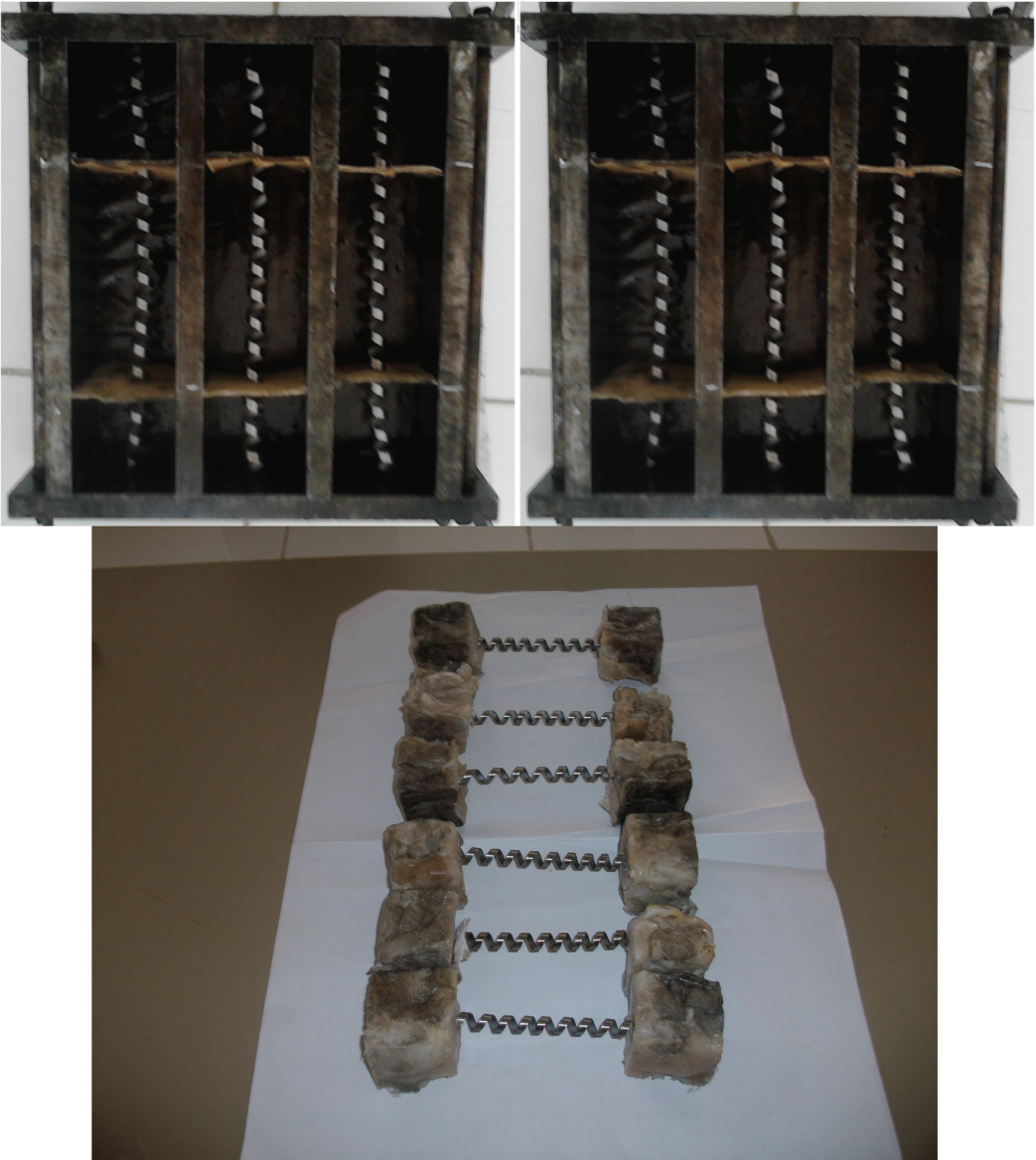


Figure II.2 préparation du système d’ancrage dans le moule à laide de la résine.

II.2.2 Appareillage et essai

Les essais sont réalisés sur une presse hydraulique à déformation contrôlée de type Ibertest (au laboratoire de modélisation des matériaux et structures de génie civil à l'université M.M. de Tizi-ouzou en Algérie). La presse est équipée d'une chaîne d'acquisition et de commande de contrôle numérique (voir vue donnée à la figure II.3). Les caractéristiques géométriques sont introduites automatiquement et la longueur utile de la fibre est 100 mm. La vitesse de chargement est de 20 mm/mn.



Figure II.3 Vue de dispositif d'essai.

II.2.3 Présentation des résultats

Les courbes représentant la contrainte en fonction de la déformation pour chaque série d'essais sont données aux figures (II.4, II.5 II.6, II.7, II.8).

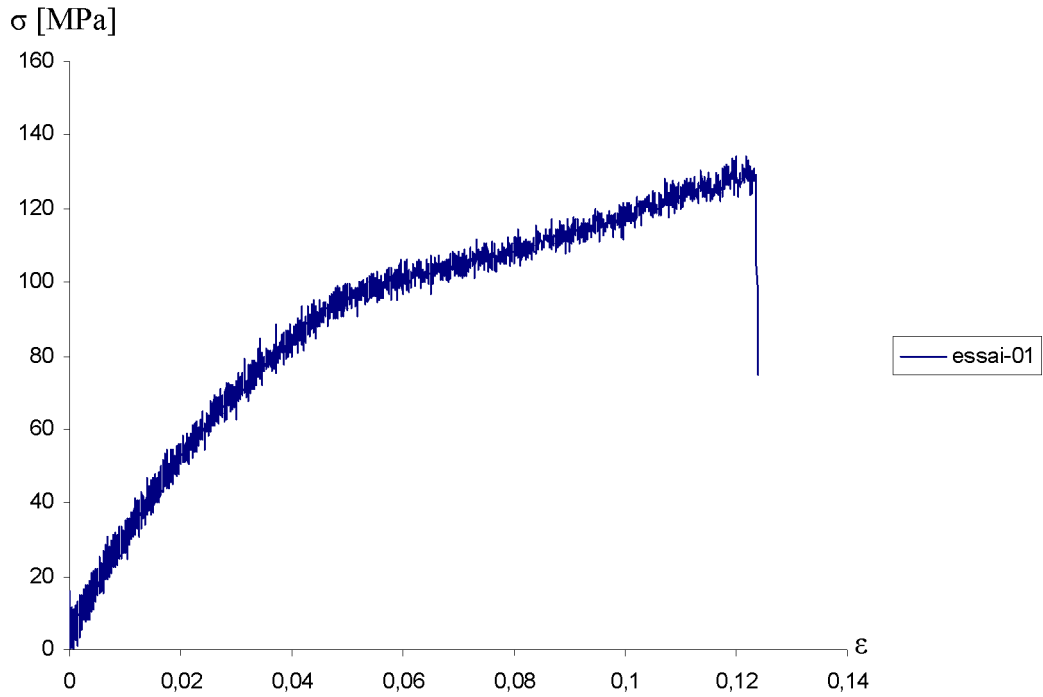


Figure II.4 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de d'essai 01

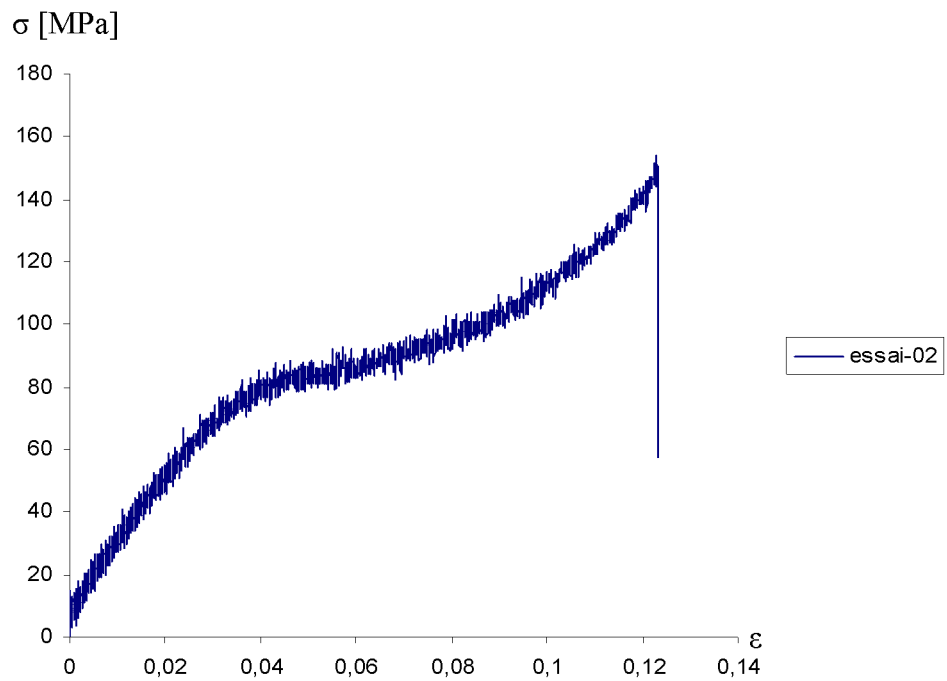


Figure II.5 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de d'essai 02

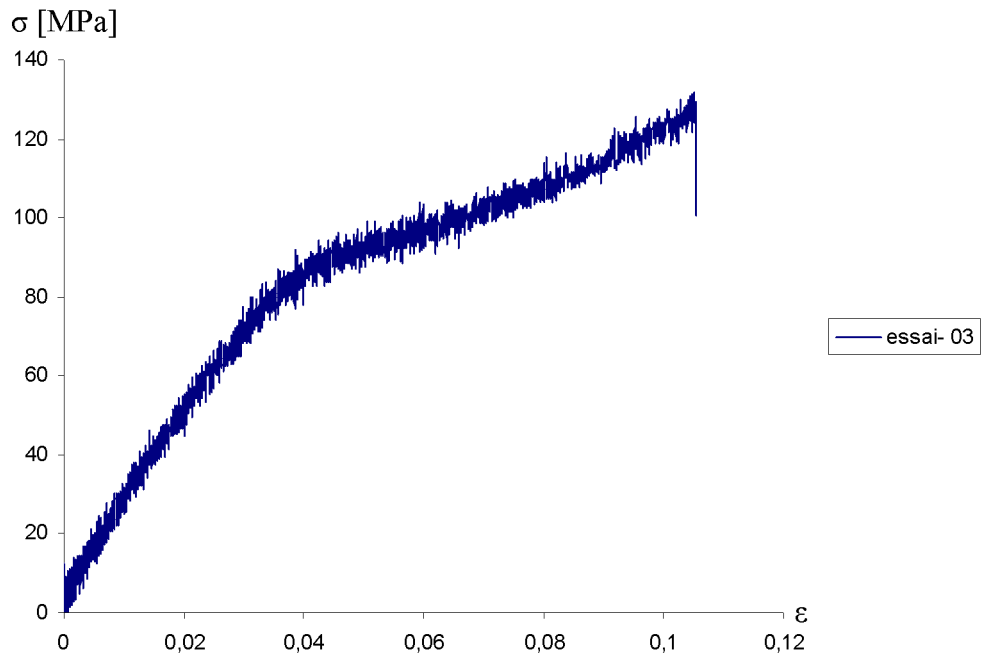


Figure II.6 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 03.

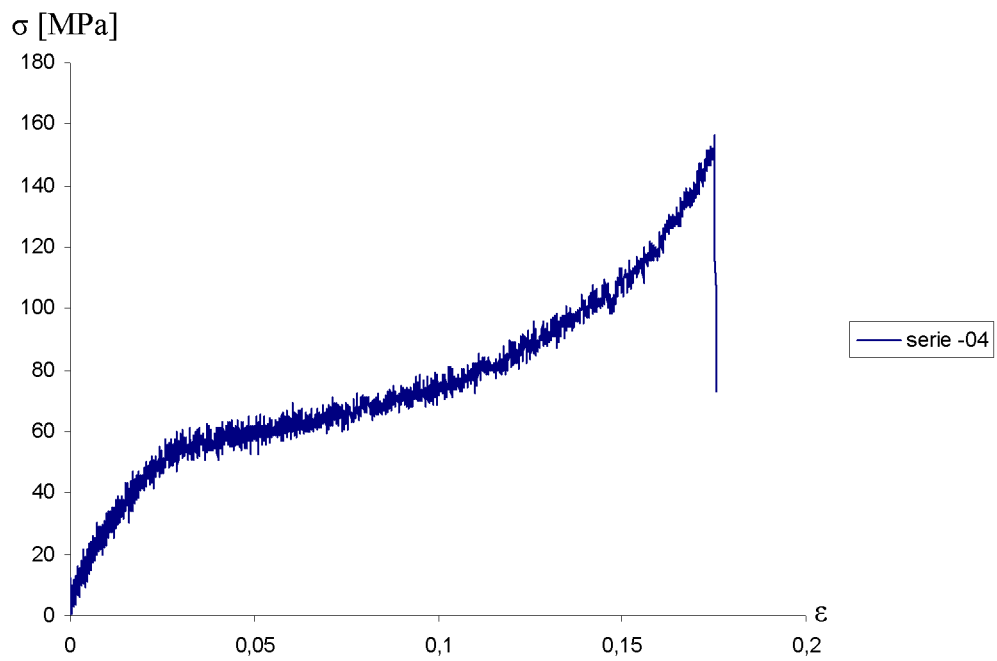


Figure II.7 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 04.

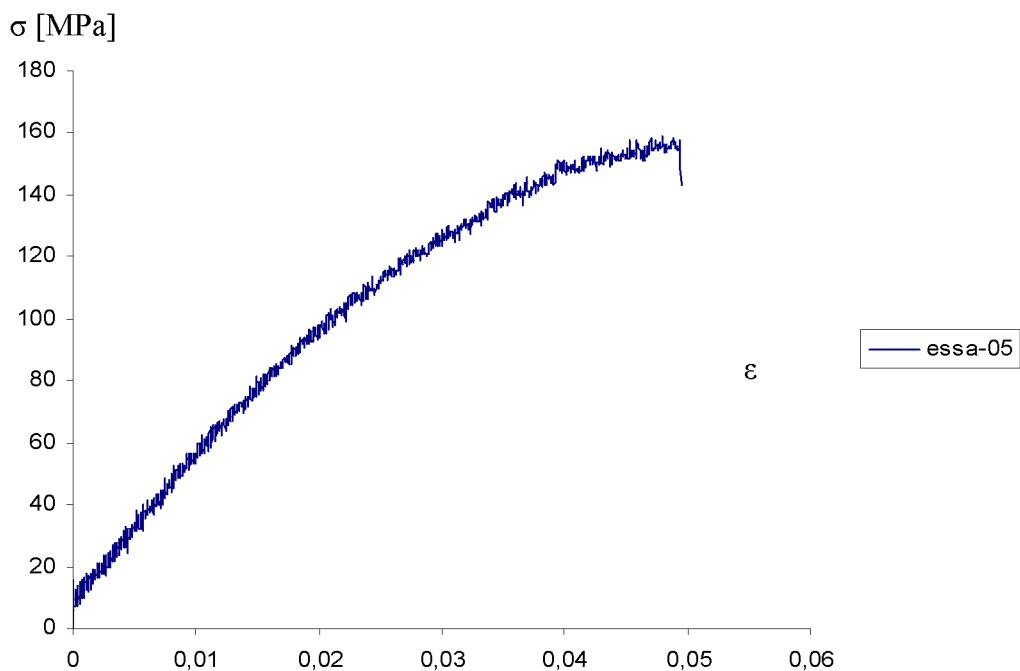


Figure II.8 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 05.

On donne sur la figure II.9 suivante la superposition des courbes moyennes contrainte - déformation pour les 05 séries d'essais réalisées considérées pour cette étude.

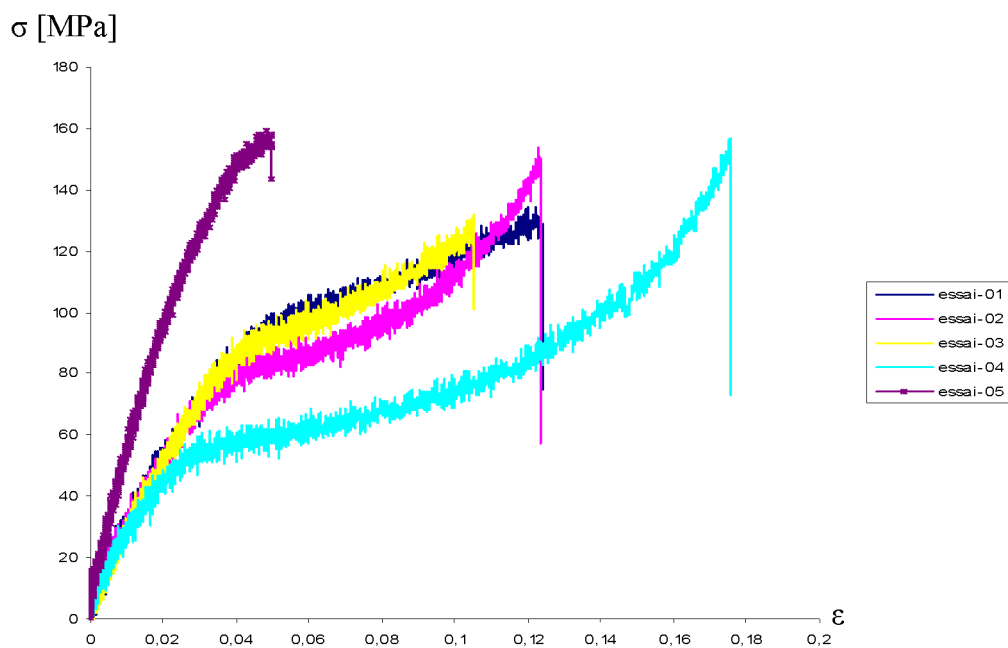


Figure II.9 Superposition des courbes $\sigma = f(\epsilon)$ pour les 05 essais réalisés.

Lors de l'essai, on constate que les ondulations de la fibre s'ouvrent progressivement jusqu'à aplatissement de la fibre. Au-delà, on observe une rupture "ductile" de l'acier. La résistance à la traction atteint la valeur $R_m = 160\text{MPa}$.

II.4 Conclusion

Cette étude nous a permis de déterminer la résistance en traction des fibres utilisées. Il apparaît que la meilleure résistance est $R_m=160\text{MPa}$.

Lors de l'essai de traction, les ondulations ont plutôt tendance à s'aplatir avant que l'acier de la fibre s'allonge.

CHAPITRE III : ETUDE DE LA COMPOSITION DU BETON

III.1.1 Introduction

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomerat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Donc le béton est constitué de :

- Liant (ciment ou chaux).
- Eau.
- Sable.
- Granulats.
- Adjuvants et additifs.

III.1.2 Les liants :

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau.

C'est le constituant fondamental du béton puisque c'est lui qui joue le rôle de cohésion des différents constituants.

Le ciment utilisé pour la confection de nos éprouvettes est de type CPJ-CEMII/A dans la classe 42,5.

III.1.3 Les sables :

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

Ils peuvent être:

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

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

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

- Extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire).
- Fins: jusqu'à 1,6 mm.
- Moyens: jusqu'à 3,15 mm.
- Gros: jusqu'à 5 mm.

Le sable que nous avons utilisé pour notre mélange provient de l'oued de diamètre maximum de 0,3 mm



Figure III .1[SABLE 0/3]

III.1.4 Les granulats :

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

Ils peuvent être :

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières,...), de nature siliceuse ou silico-calcaire.
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites.

Ils sont anguleux et durs.

Les granulats peuvent se classer selon les diamètres :

- Petits : de 3 à 8 mm (en tamis), soit 1mm (en passoire).
- Moyens : de 8 à 15 mm.
- Gros : de 15 à 25 mm.
- Très gros : de 25 à 40 mm.

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures concassées. Leur diamètre varie de 3 à 20 mm.



Figure : III .2 [GRAVIER3/8]



Figure : III .3[gravier 8/15]

III.1.5 Les adjuvants et additifs :

III.1.5 .1 Les adjuvants : sont des matériaux actifs ajoutés en très petite quantité (souvent liquide) dans le but d'influencer certaines propriétés par une action chimique ou physique. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton armé.

III.1.5 .2 Les additifs : sont des matériaux en fines particules qui peuvent être ajoutés en quantités limitées pour influencer certaines propriétés ou obtenir des propriétés particulières. Ils sont à prendre en compte dans la composition volumétrique. On peut distinguer les additifs à caractère hydraulique latent (ex: cendres volantes,...) qui renforcent le pouvoir de liaison ciment et les additifs neutres (ex: poudres colorantes,...). Ces additifs doivent bien sûr être sans danger pour le béton.

Il faut également veiller à la compatibilité des adjuvants et additifs entre eux. Cela se fait à l'aide de tables.

Les principaux adjuvants sont :

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

III.1.6 Rôle des différents éléments constituant le béton

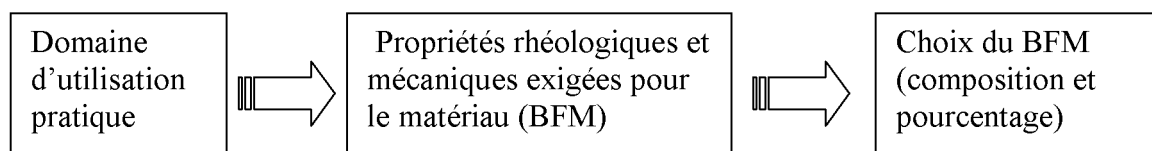
- **Ciment:** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats:** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- **Les plastifiants:** ils augmentent l'« ouvrabilité » du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

III.2 Analyse granulométrique

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

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

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. L'ample intérêt que montrent beaucoup de domaines, pour les BFM, implique que leur adaptation pour chacun de ces domaines est impérative. C'est la raison qui fait que l'optimisation de la composition des BFM doit être pertinente et satisfaisante aux exigences de la fonction qu'ils doivent remplir. Ainsi le squelette granulaire doit être optimisé en fonction du type et du pourcentage en fibres incorporées. Cette démarche méthodologique peut être schématisée comme suit :



III.2.1 Principe de l'essai :

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

III.2.2 Equipements utilisés :

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

III.2.3 Description de l'essai :

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme roulée, leur diamètre est de 0/3, 3/8 et de 8/15. Une fois ces matériaux sont lavés, ils seront après, séchés à l'étuve à une température maximale de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 , la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit R_2 , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (III.1, III.2, III.3) suivants :

Dimension des tamis en (mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5	11.4	11.4	0.76	99.24
2.5	129.8	141.2	9.41	90.59
1.25	445.1	586.3	39.08	60.92
0.63	350.0	936.3	62.42	37.58
0.315	353.0	1289.3	85.95	14.05
0.16	157.3	1446.6	96.44	3.56
0.08	14.2	1460.08	97.39	2.61
Fond	38.6	1499.4	99.96	0.04

Tableau III.1 Analyse granulométrique du sable.

Dimension des tamis (en mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
10	149.7	149.7	4.99	95.01
8	597.2	746.9	27.90	75.10
6.3	881.3	1628.2	54.27	45.73
5	793.4	2421.6	80.72	19.28
4	265.1	2686.7	89.56	10.44
3.15	222.8	2909.5	96.98	3.02
2.5	21.8	2931.3	97.71	2.29
Fond	68.3	2999.6	99.99	0.03

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

Dimension des tamis en (mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
20	0	0	0	100
16	113.2	113.2	3.77	96.23
12.5	711.7	824.9	27.50	72.50
10	696.1	1521	50.70	49.30
8	611.8	2132.8	71.09	28.91
6.3	525.4	2658.2	88.61	11.39
5	231.7	2889.9	96.33	3.67
Fond	110.1	3000	100	0

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

Les valeurs des différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, voir figure III.4.

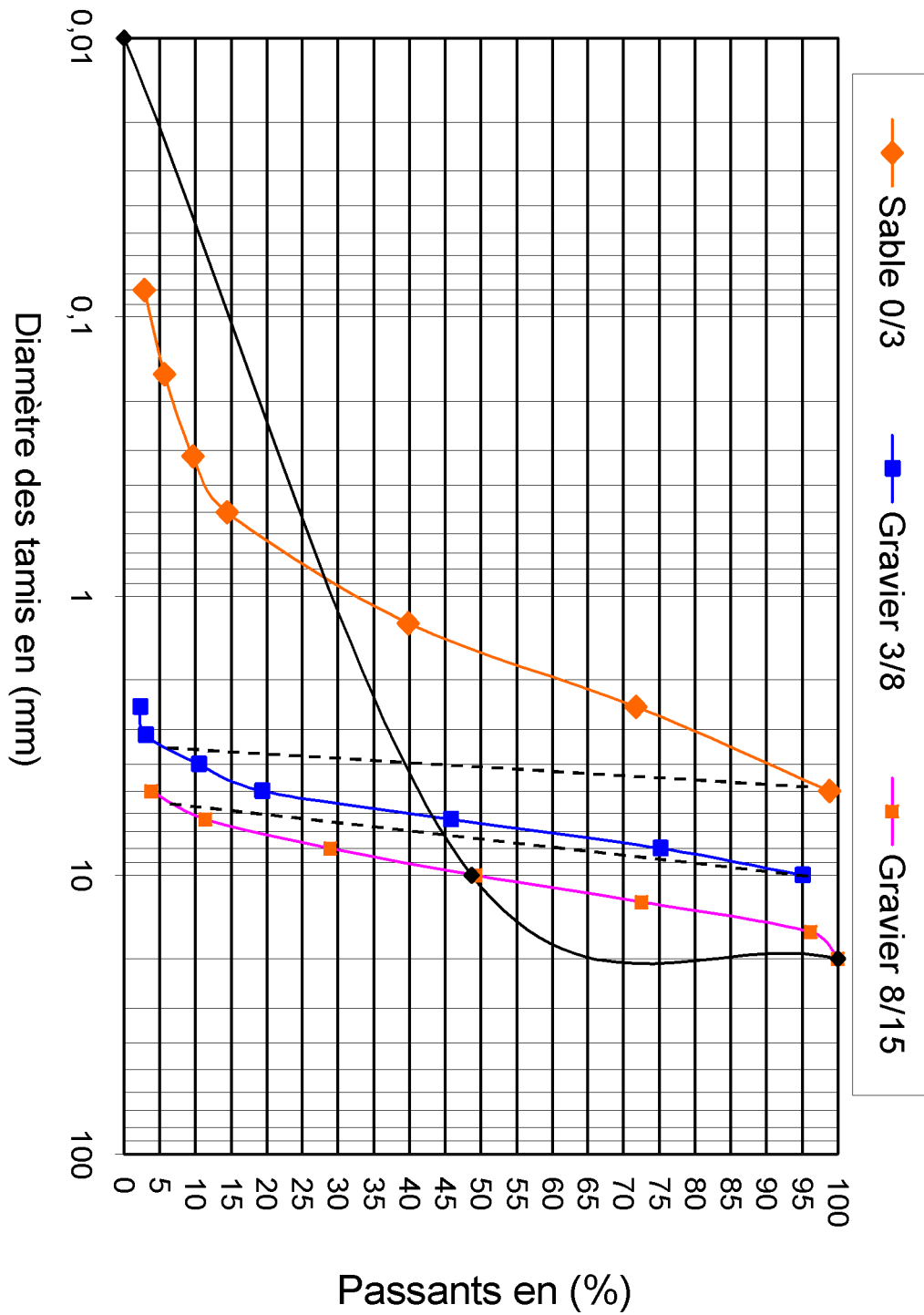


Figure III.4 Courbe Granulométrique.

III.2.4 Module de finesse :

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

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

$$M. F \text{ d'un sable} = \text{refus sur les tamis} = \frac{0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \text{ mm}}{100}$$

$$M. F = \frac{96.44 + 85.95 + 62.42 + 39.08 + 9.41 + 0.76}{100} = 2,94$$

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

III.3 Composition de béton par la méthode de Dreux-Gorisse :

Cette méthode a été retenue pour sa simplicité à déterminer les différents composants du béton [28].

III.3.1 Résistance visée :

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

$$\sigma'_{28j} = \sigma_{28j} + 0.15\sigma_{28j} \quad \text{Soit :} \quad \sigma'_{28j} = 1.15\sigma_{28j}$$

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

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

III.3.2 Dosage en ciment et eau :

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

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

Avec :

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

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

S_c : Classe vraie de ciment en MPa.

G : Coefficient granulaire.

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

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

❖ Choix approprié du coefficient granulaire G :

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur est choisie dans le tableau II.4 ci-après établi par George DREUX [28].

Qualité granulats	Dimension D des granulats		
	$D \leq 16\text{mm}$	$25 \leq D \leq 40\text{mm}$	$D \geq 63\text{mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau III.4 Valeurs approximatives du coefficient

Les granulats utilisés ont un diamètre inférieur à 16 mm, ce qui donne le coefficient granulaire $G=0.45$, avec une bonne qualité.

❖ Choix de la classe vraie de ciment

Parmi la liste des ciments disponibles sur le marché des matériaux de construction, nous avons retenu le ciment CEM CPJII42.5. Sa classe vraie est estimée à 47.5 MPa.

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

❖ Dosage en ciment par m³ de béton :

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

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

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

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

❖ Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur le même graphe d'analyse granulométrique, Type AFNOR (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis) déjà obtenu, voir (figure III.8), on trace une composition granulaire de référence OAB avec :

Le point O est repéré par ses coordonnées: [0.080 ;0]

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

Le point de brisure A a des coordonnées:

En abscisse :

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

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et le module de finesse de sable.

Comme le module de finesse de sable M_f vaut 2.94, celui-ci est classé comme un sable grossier, la valeur du coefficient de correction K sera calculée par la formule suivante :

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

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

Ainsi, les coordonnées du points de brisure A sont : [8 ; 49].

❖ La ligne de partage

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

On obtient donc un mélange optimal avec un volume absolu de 38.5 % de sable 0/3 et 71.5% de gravier (Gravier 3/8: 6.5 %+ Gravier 8/5 : 55 %). Sur la courbe granulométrie, les points d'intersection entre les lignes de partage et la courbe OAB donnent les pourcentages des granulats suivants :

- Sable 0/3 : 38.5 %
- Gravier 3/8 : 6.5 %
- Gravier 8/5 : 55 %

❖ Coefficient de compacité

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

$$V_M = V_S + V_G + V_C$$

au volume total du béton frais soit un mètre cube :

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

En utilisant le tableau valeurs du coefficient de compacité [28] et après interpolation pour un diamètre maximum de granulats égal à 16 mm, on trouve une valeur de $\gamma = 0.8146$. Nous avons retenu une valeur de γ telle que : $\gamma = 0.81$.

III.3.3 Dosage des Granulats :

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

- Volume absolu du ciment : $V_C = \frac{m_C}{\gamma} = \frac{380}{3.1} = 122.58$ litres

Avec : m_C : dosage (en masse) de ciment

$\gamma = 3.1$ g/ml: masse volumique

- Volume absolu des granulats (l'ensemble) :

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

- Volume absolu du sable : $V_S = \frac{V_G \times 38.5}{100} = \frac{687.42 \times 38.5}{100} = 264.66 \text{ litre}$
- Volume absolu du gravier 3/8 : $V_{G3/8} = \frac{V_G \times 6.5}{100} = \frac{687.42 \times 6.5}{100} = 44.68 \text{ litre}$
- Volume absolu du gravier 8/15 : $V_{G8/15} = \frac{V_G \times 55}{100} = \frac{687.42 \times 55}{100} = 378.08 \text{ litre}$

Les dosages en masse des éléments secs (granulats, sable) pour 1 m^3 de béton sont donnés par :

- Masse de sable. $M_S = V_S \times \gamma_S = 264.66 \times 2.65 = 701.35 \text{ kg}$
- Masse de graviers 3/8. $M_{G3/8} = V_{G3/8} \times \gamma_{G3/8} = 44.68 \times 2.61 = 116.61 \text{ kg}$
- Masse de graviers 8/15. $M_{8/15} = V_{G8/15} \times \gamma_{G8/15} = 378.08 \times 2.58 = 975.45 \text{ kg}$

Pour préparer 1 m^3 de béton, il faudra donc les masses suivantes (voir tableau III.5) :

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

Tableau III.5 Constituants du béton pour un volume de 1 m^3 .

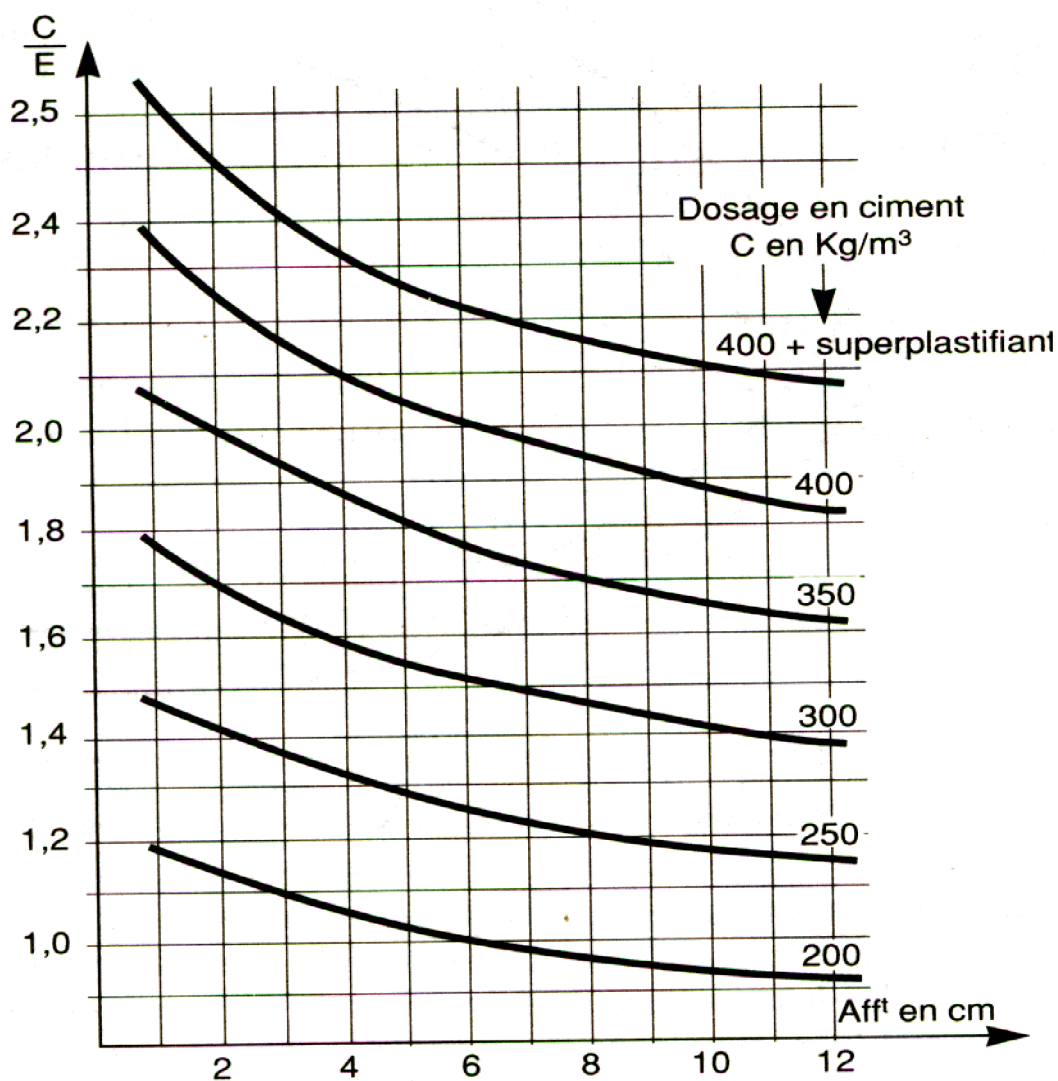


Figure III.5 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de L'ouvrabilité désirée

Une fois obtenue la masse volumiques des fibres (W), on détermine le poids des différents pourcentages pour 1m³ de béton qui est présenté dans le tableau III.6.

Fractions volumiques des fibres W %	0,6%	0,8%
Masses en (kg)	47,3	62,9

Tableau III.6 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m³ de béton.

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT EN FLEXION ET AU CISAILLEMENT DU BETON RENFORCEE PAR DES FIBRES LONGUES.

IV.1 INTRODUCTION

Afin d'étudier le comportement du béton renforcés de fibres de récupération « fibres longues », des séries d'essais en flexion «des essais de flexion 3- points» et des essais de cisaillement « des essais flexion 4-points » sur des éprouvettes prismatiques de dimensions [10x20x120] cm ont été réalisées au laboratoire de Génie-Civil, pour suivre le comportement de ces bétons armés renforcés de ces fibres longues (grandes longueurs) en flexion ainsi que au cisaillement (résistance à l'effort tranchant) . Les teneurs optimums en fibres retenues pour ces deux séries d'essais est : $W=0,6\%$, et $W=0,8\%$ ainsi que le béton témoin BT ($W=0\%$).

IV.2 Géométrie et composition des poutres testées :

IV.2.1 Géométrie : elles sont de forme prismatique de largeur $l= 10$ cm, hauteur $h= 20$ cm et une longueur $L= 120$ cm, [10x20x120] cm. La longueur des fibres utilisées est de $L=120$ cm, sont étirées de façon à permettre un enrobage suffisant en béton, après les étirassions on a trouver que pour une longueur de 120cm on obtient 48 ondulations.

donc pour 120cm \longrightarrow $n=48$,n: le nombre des ondulations



Figure IV.1 : fibres utilisées avant étirassions

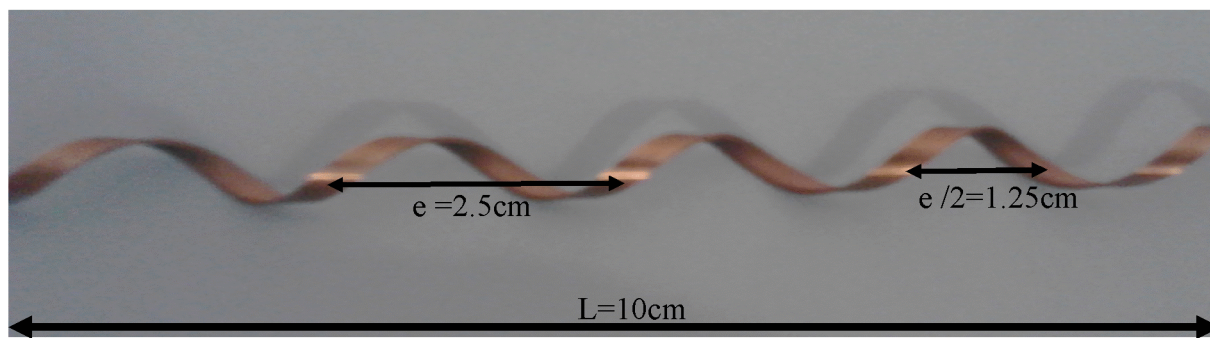


FIGURE IV.2 : une partie d'une fibre utilisée de longueur $L=10\text{cm}$.

Les moules prismatiques et fibres longues utilisées ainsi que le vibreur sont présentés à la figure IV.3.

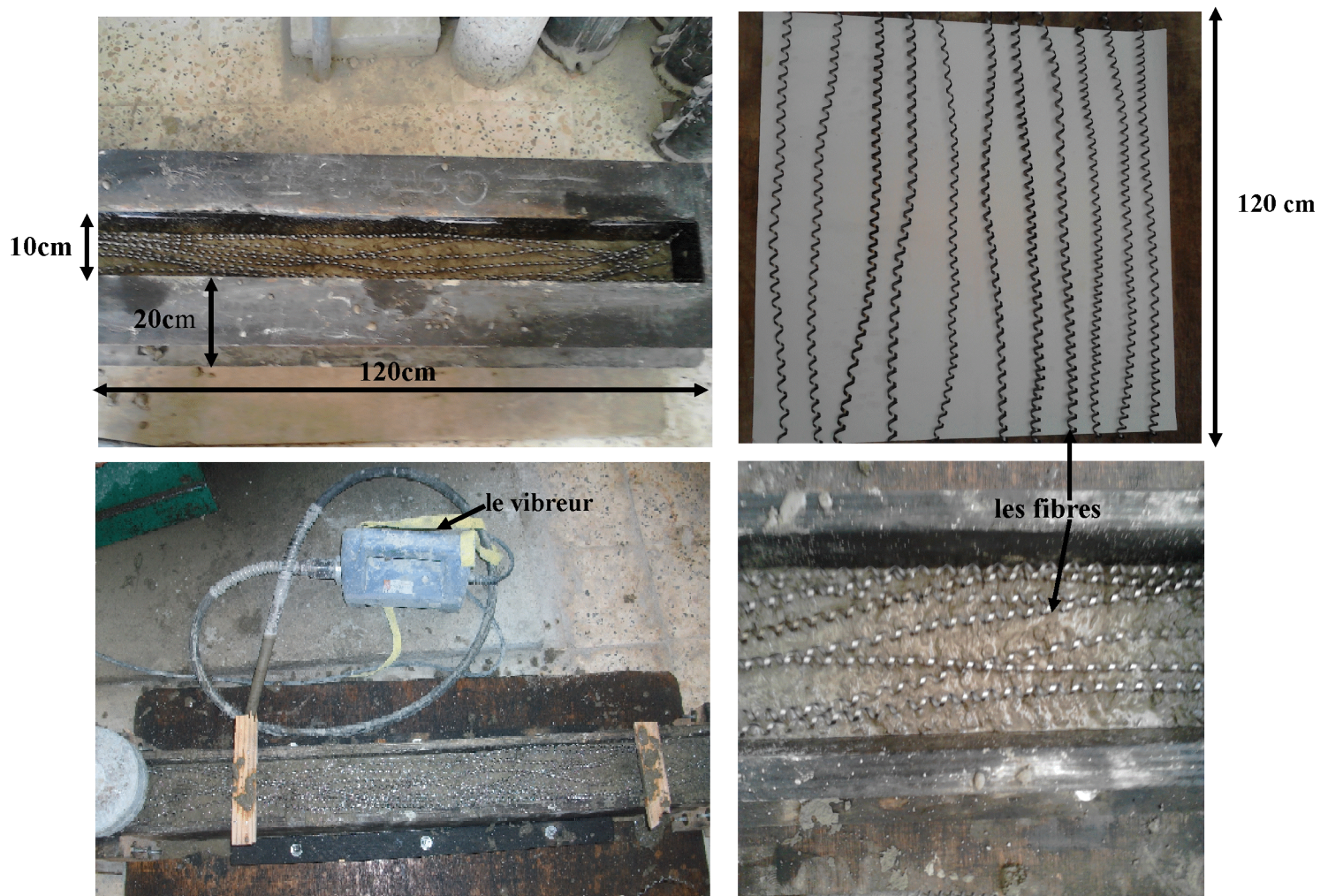


Figure IV. 3 Moules prismatiques et fibres longues utilisées ainsi que le vibreur.

IV.2.2 Mise en œuvre des poutres renforcées des fibres longues.

Les fibres de longueur brute ($L=120\text{cm}$), sont disposées dans le sens de la longueur de la poutre (fibres orientées) et disposées en 4 couches voir figure IV.4 et une vibration a été effectuée après la disposition de chaque couche. (Voir figures IV.3 et IV.4)

La figure IV.4 montre la mise en œuvre (disposition des fibres et les couches du béton), selon la hauteur des poutres ($H=20\text{cm}$).

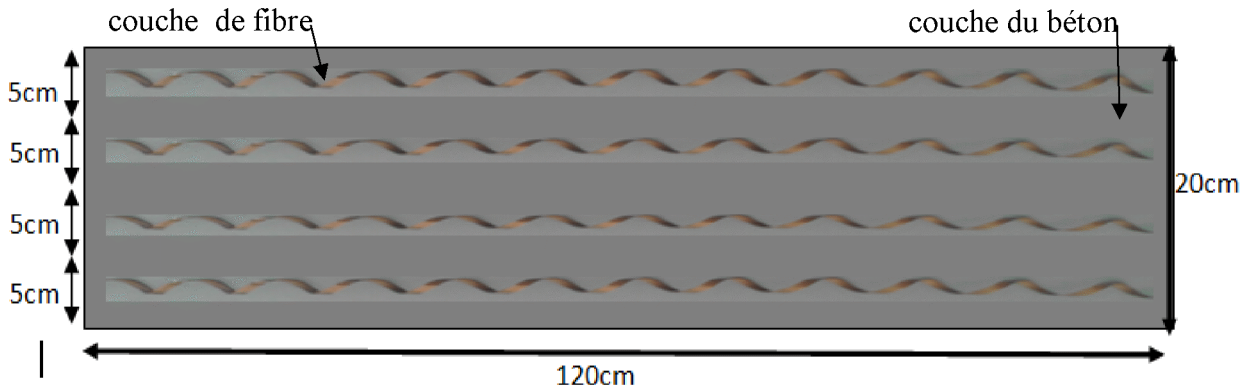


figure IV.4 : disposition des fibres et le béton pour une hauteur des poutres $H=20\text{cm}$.

IV.2.3 Composition des éprouvettes

La composition des éprouvettes est déterminées par la méthode de Dreux-Gorisse, cette composition optimale du béton pour un 1 m^3 , déterminée en fonction du pourcentage en fibres et la composition pour une éprouvette prismatique $[10 \times 20 \times 120]\text{ cm}$ et pour un volume de 1 m^3 , est données dans le tableau IV.1 ci- dessous.

les fractions volumiques choisis de fibres est de $W=0,6\%$ et $W=0,8\%$.

Constituants du béton	volume 1 m^3	Eprouvette prismatique ($10 \times 20 \times 120$)
- Sable 0/3 (kg)	701.35	16.83
-Gravier 3/8 (kg)	116.61	2.80
- Graviers 8/15 (kg)	975.45	23.41
- Ciment CPJ CEMII/A 42.5(C) (kg)	380	9,12
-Eau (E) (kg)	206.52	4,96

Tableau IV.1 Compositions optimisées pour 1 m^3 du béton et pour une éprouvette $[10 \times 20 \times 120]\text{ cm}$.

La masse pour les teneurs en fibres pour 1m^3 de béton, ainsi pour une éprouvette prismatique de dimensions $[10 \times 20 \times 120]$ cm, sont données dans le tableau IV.2.

Fractions volumiques des fibres W %	0,6%	0,8%
Masses pour 1m^3 (kg)	47,3	62,9
Pour une poutre prismatique (10x20x120) cm (kg)	1,13	1.51

Tableau IV.2 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m^3 de béton et pour une éprouvette prismatique $[10 \times 20 \times 120]$ cm.

IV.2.4 Appareillage et essais

Les essais effectués, essais de flexion 3-points et les essais de flexion 4-points, sont réalisées sur une presse hydraulique à déformation contrôlée de type Ibertest au laboratoire de modélisation des matériaux et structures de génie civil à l'université M.M de Tizi-ouzou en Algérie. La presse est équipé d'une chaîne d'acquisition et commande numérique (voire vus donnée à la figure IV.5). Les caractéristiques géométriques des poutres testées sont introduites automatiquement. La capacité de la machine est de 200kN.

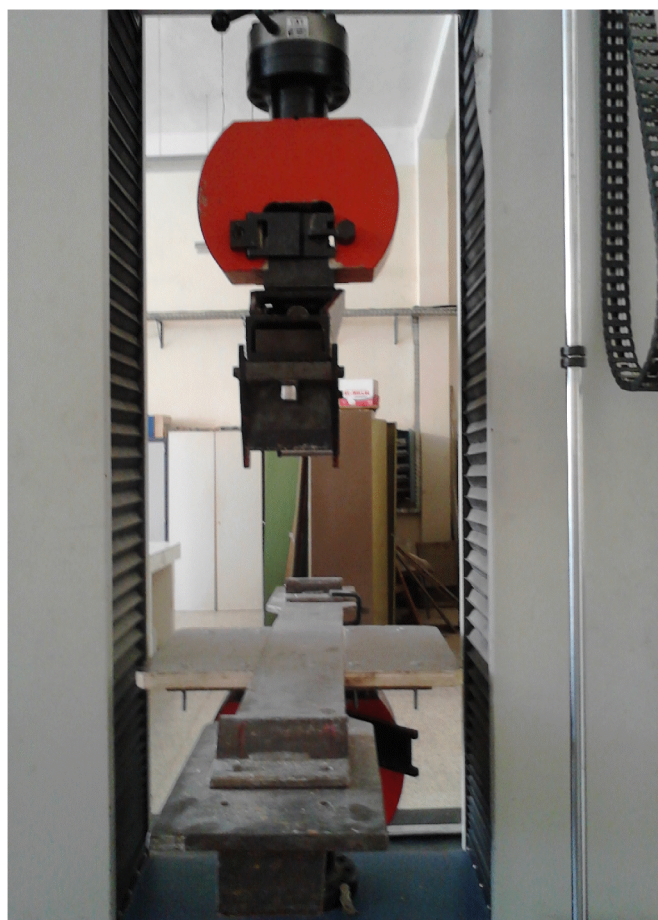


Figure IV.5 Vue du dispositif d'essai « Ibertest ».

IV.3 Description des essais

A fin de suivre le comportement du béton renforcé de fibres de récupération « fibres longues », en flexion et au cisaillement (résistance à l'effort tranchant), des essais de flexion 3- points et des essais flexion 4- points ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques.

Deux teneurs en fibres optimums retenues pour chaque série de test est $W=0,6\%$ et $W=0,8\%$ ainsi que le béton témoin BT (sans fibres $W=0\%$).

IV.4 Essais de flexion 3-points

Des essais de flexion 3-points ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $[10 \times 20 \times 120]$ cm (voir figure IV.3), pour les deux fractions volumiques $W=0,6\%$ et $W=0,8\%$ ainsi que des bétons témoins (sans fibres). Un total de six (6) poutres on été testées,

La figure IV.6 illustre le principe et le schéma statique de l'essai de flexion 3- points.

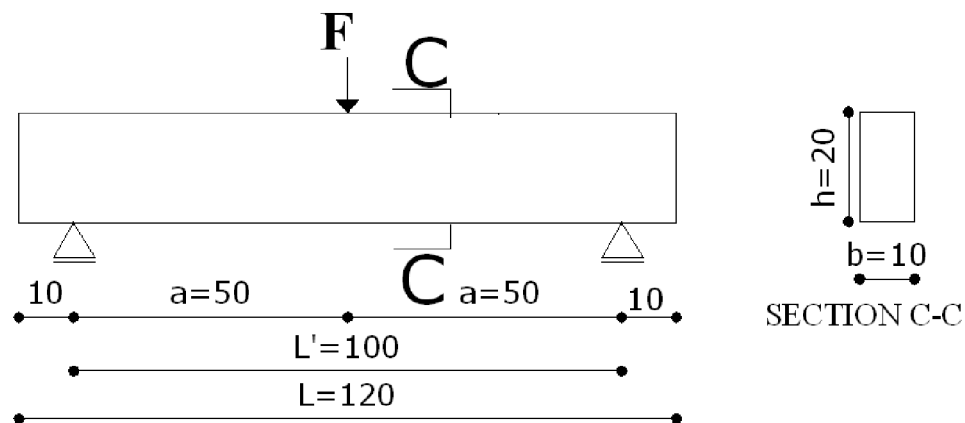


Figure IV.6 Schéma statique de l'essai de flexion 3- points.

Avec :

L : Longueur de l'éprouvette.

L' : Distance entre les deux appuis.

a : Distance entre appuis et le point d'application de l'effort.

b : Largeur de l'éprouvette.

h : Hauteur de l'éprouvette.

F : La charge appliquée.

La figure IV.7 présente un exemple lors de d'essai flexion 3-points.



Figure IV. 7 Exemple d'essai flexion 3-points.

IV. 4.1 Présentation des résultats et discussions

Les résultats donnés correspondent à la moyenne de deux essais réalisés pour chaque fraction volumique ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$) de fibres et pour le béton témoin BT (sans fibres).

IV.4.2 Résultats des essais flexion 3- points

La figure IV.8 illustre un exemple du mode de rupture des poutres testée lors des essais en flexion 3-points.



Figure IV.8 Exemple du mode de rupture des poutres lors des essais flexion 3-points.

Il y a eu ouverture d'une fissure très franche de flexion avec mise en jeu des fibres sollicitées en traction. Alors que dans le cas du béton témoin la rupture survient plus rapidement.

le tableau IV.3 représente les forces (charges) à la rupture en flexion pour le béton témoin ($w=0\%$) et les teneurs en fibres ($w=0.6\%$ et 0.8%)

	BT : W=0%	BF : W=0,6%	BF : W=0,8%
Forces à la rupture en flexion (KN).	8,03	10.28	11,31

Tableau IV.3 : forces à la rupture en flexion.

Les courbes représentant la force en fonction de la flèche en travée pour chaque fraction volumique ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$) et pour le béton témoin BT (sans fibres), sont données respectivement sous forme de graphe comme suit :

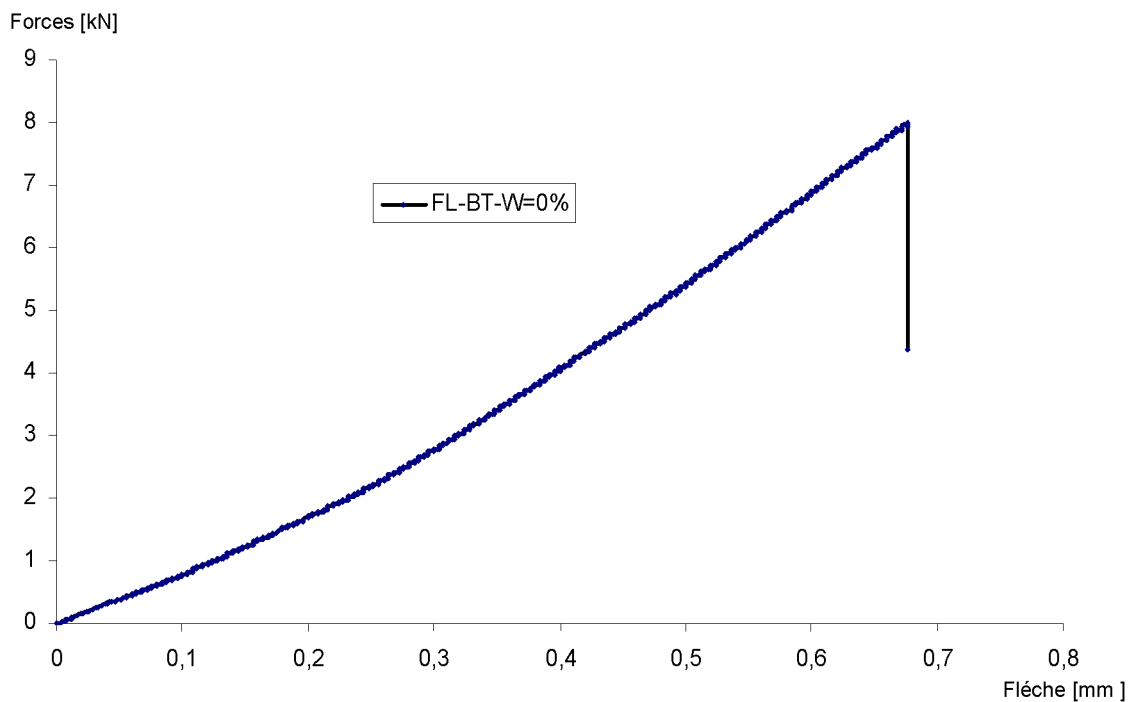
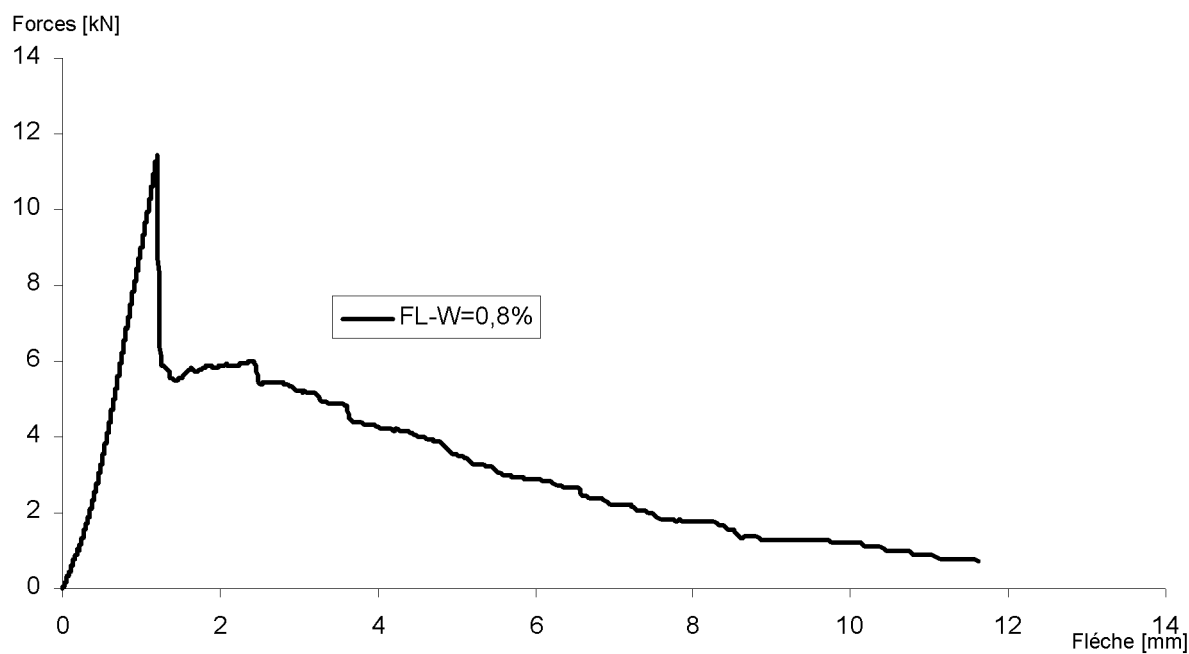
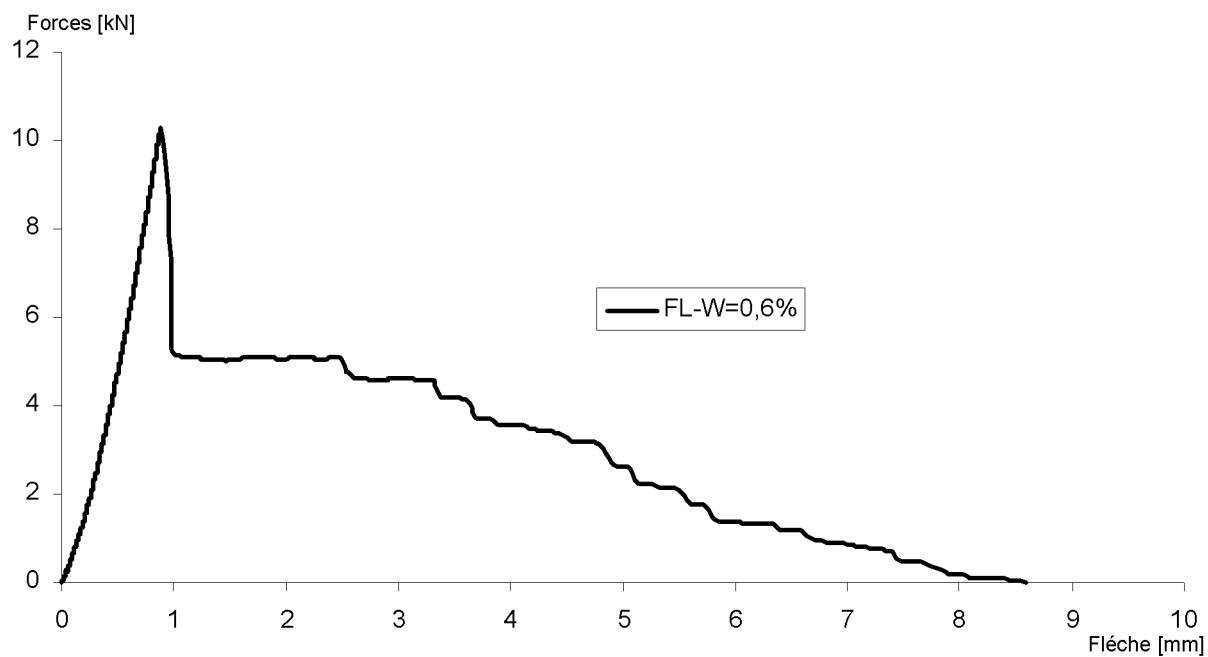


Figure IV.9 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.



On donne sur la figure IV.12 suivante la superposition des courbes moyennes force- flèche en travée pour les teneurs en fibres $W=0.6\%$, 0.8% et le béton témoin BT (sans fibres).

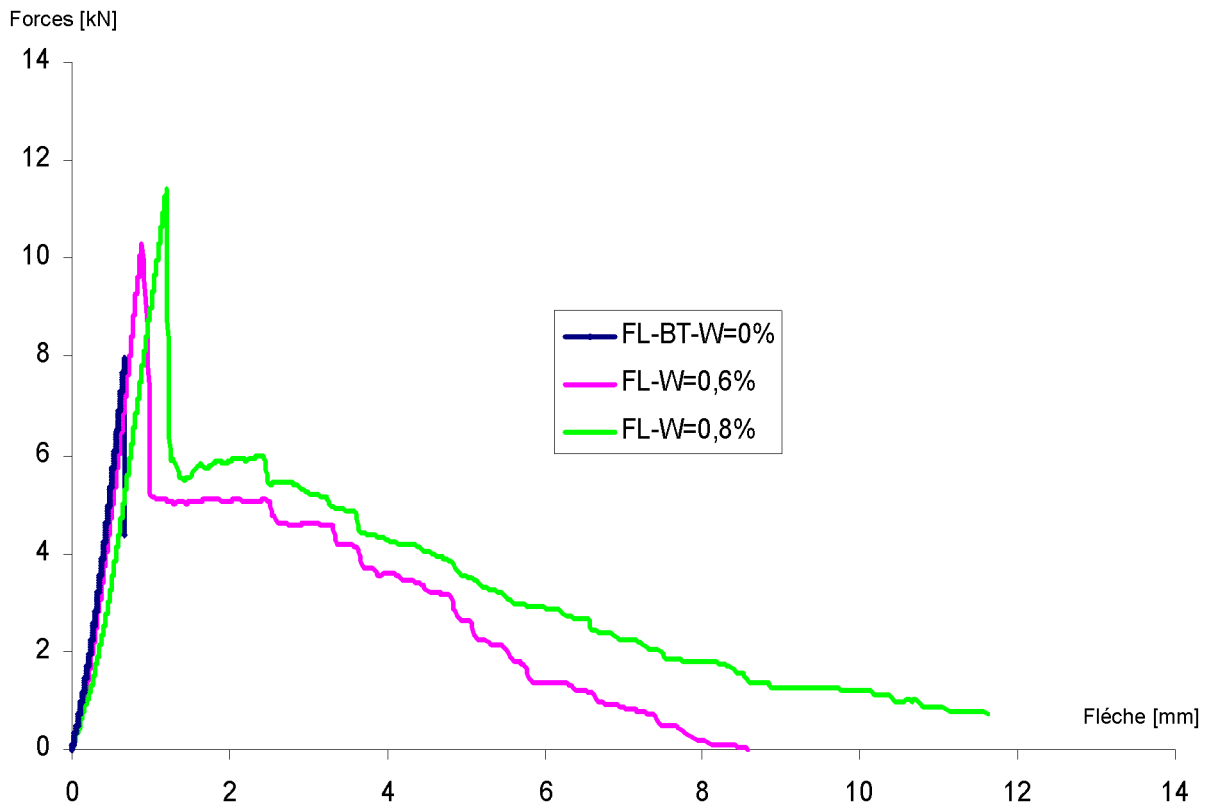


Figure IV.12 Superposition des Courbes moyennes force-flèche pour BT, W=0,6% et W=0,8%.

La figure IV.12 représente les résultats obtenus par les essais de flexion 3-points, pour les teneurs en fibres $W=0,6\%$, $0,8\%$ et béton témoin BT (sans fibres). Nous observons à travers les courbes force-flèche en travée :

- La résistance et la rigidité en flexion des poutres avec une teneur en fibre $W=0,8\%$ est meilleure que les poutres avec une teneur en fibre $w=0,6\%$ et les poutres de béton témoin BT.
- Ces résultats obtenus montrent aussi que l'ajout des fibres confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin (sans fibres).
- D'autre part le comportement du béton de fibres en flexion, se caractérise par la présence de deux (2) phases :

1- Une phase linéaire correspondant à un comportement quasi – élastique du matériau, c'est la phase de pré fissuration du béton. Cette phase se termine par l'apparition de la macro fissure.

2- Une deuxième phase dans laquelle on observe une chute brutale, sans rupture brusque de la poutre, de la capacité portante du matériau, c'est la phase post fissuration. Dans cette phase la

matrice béton rompt et les bords de la fissure sont reliés par les fibres (voir figure IV.8) ce qui permet d'éviter une rupture brutale.

Ces résultats de la figure IV.12, nous ont permis de constater aussi que l'effort de rupture des poutres avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F=11,31$ KN) est augmenté d'environ 41 %, par rapport aux poutres sans fibres (BT) ($F=8,03$ KN). Par contre la déformation (flèche) à mi travées est augmenté d'environ 64%, et ça s'explique par le nombre de fibres important qui traverse la zone de rupture des poutres testées (voir figure IV.8).

IV.5 Essais de rupture a l'effort tranchant (flexion 4-points):

Pour cette série d'essais un total de (06) poutres ont été réalisées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions $[10 \times 20 \times 120]$ cm, en flexion 4-points, à fin de suivre le comportement au cisaillement (résistance à l'effort tranchant) de béton renforcée de « fibres longues », pour les deux fractions volumiques $W=0,6\%$ et $W=0,8\%$) ainsi que pour le béton témoin BT (sans fibres). Pour cette série de test deux armatures longitudinaux dans la partie tendue ont été utilisées de diamètre $\varnothing = 8$ mm,

La figure VI.13 illustre le principe et le schéma statique de l'essai de flexion 4-points, pour cette série d'essais.

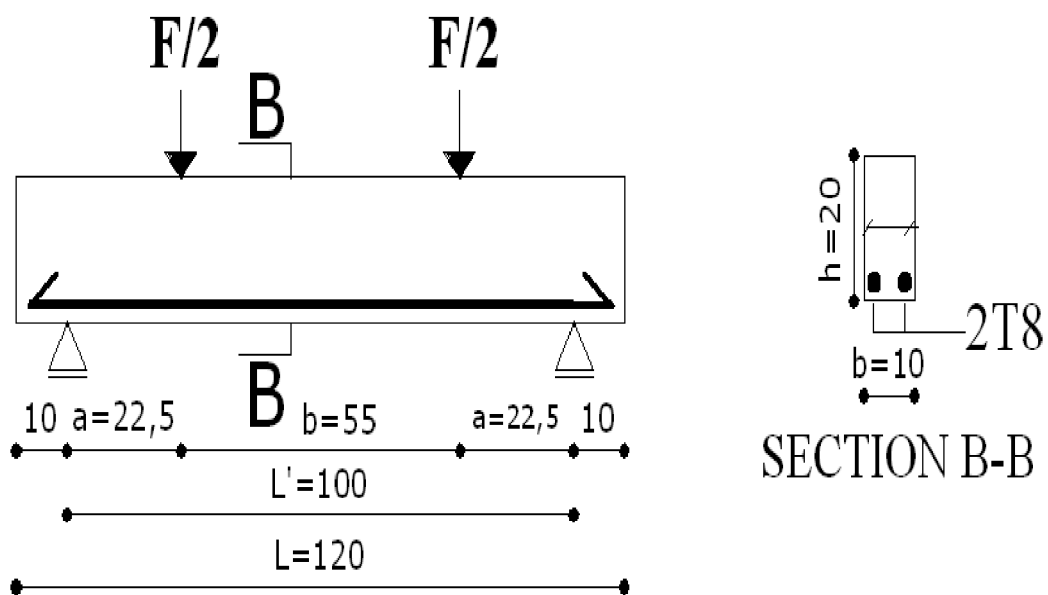


Figure VI.13 Schéma statique de la série d'essais en flexion 4-points.

La figure VI.14 présente un exemple lors de d'essai flexion 4-points.



Figure IV. 14 Exemple d'essai flexion 4-points.

IV. 5.1 Présentation des résultats et discussions

Les résultats donnés correspondent à la moyenne de deux essais réalisés pour chaque fraction volumique ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$) de fibres et pour le béton témoin BT (sans fibres).

VI.5.2 Résultats des essais de rupture à l'effort tranchant :

Voilà à titre d'exemple quelques images prises lors des essais de rupture a l'effort tranchant qui présentent le début d'ouverture des fissures en fonction de la force appliqué pour une teneur en fibres $W=0,8\%$, voir figures (IV. 15, IV.16 et IV.17).

Avant la rupture

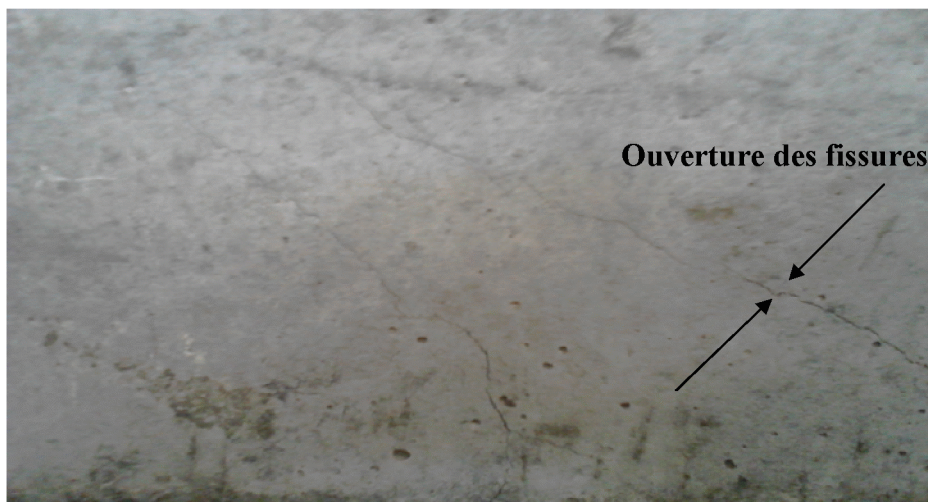


Figure IV.15 Début d'ouverture de fissure diagonale pour une force $F= 80.68$ KN.

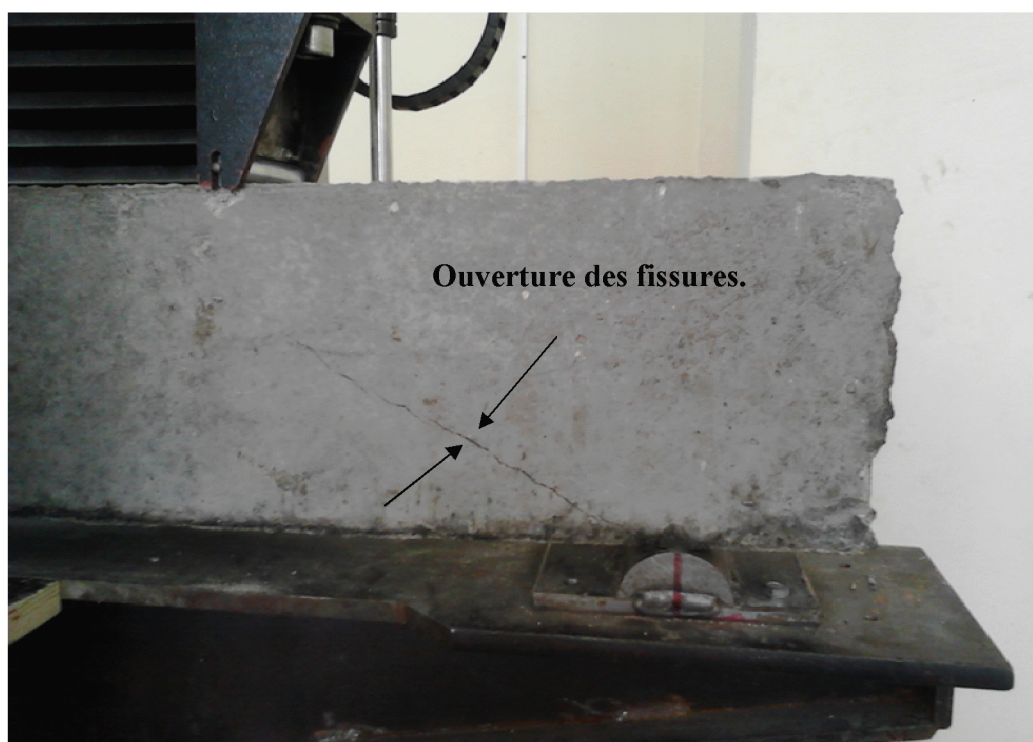


Figure IV.16 Ouverture de fissure diagonale pour une force $F= 86.78$ KN.



Figure IV. 17 Ouverture de fissure diagonale pour une force $F= 94.03$ KN.

Après la rupture

Les figures IV.18 et IV.19 illustrent le mode de rupture des poutres testées lors des essais de rupture a l'effort tranchant.

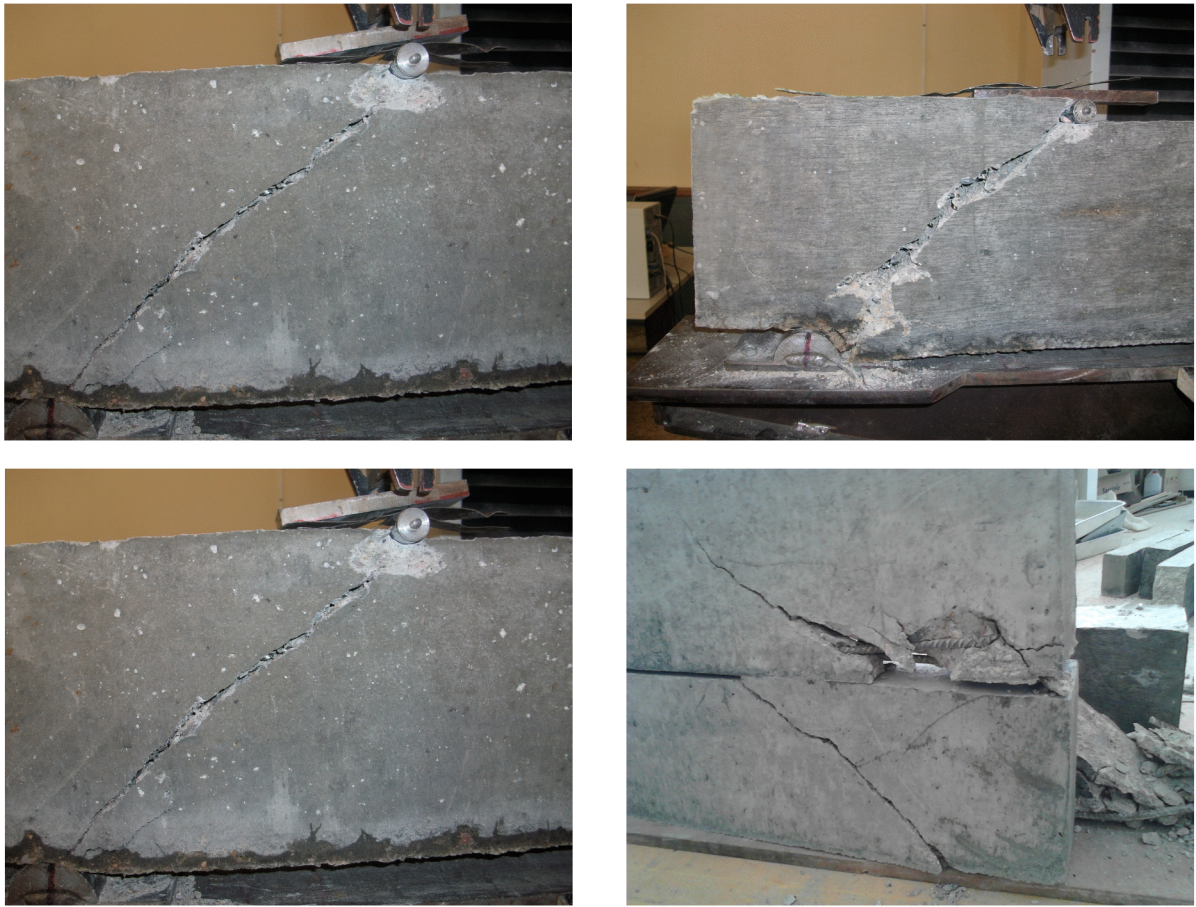


Figure VI.18 Mode de rupture des poutres testées lors des essais de rupture a l'effort tranchant pour une teneur en fibre $w=0,8\%$



Figure VI.19 Mode de rupture d'une poutre testée montre les bords de la fissure qui sont reliés par les fibres

Il y a fissuration diagonale, et le mode de rupture est le cisaillement diagonale avec début d'écrasement du béton à l'apex de la fissure. Dans certain cas on a observé un fendage diagonale, le tableau IV.4 représente les forces maximales à la rupture pour le BT ($w=0\%$) et les pourcentages en fibres ($w=0.6\%$ et $w=0.8\%$).

Forces à la ruptures [kN]	BT W=0%	BF: W=0.6%	BF: W=0.8%
	33.9	40.10	50

Tableau IV .4 : forces a la rupture des poutres testées

Les courbes de cisaillement représentant la force en fonction de la flèche en travée pour chaque fraction volumique ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$) et pour le béton témoin BT (sans fibres), sont données respectivement sous forme de graphe comme suit :

Béton témoin BT (sans fibres), sont données respectivement sous forme de graphe

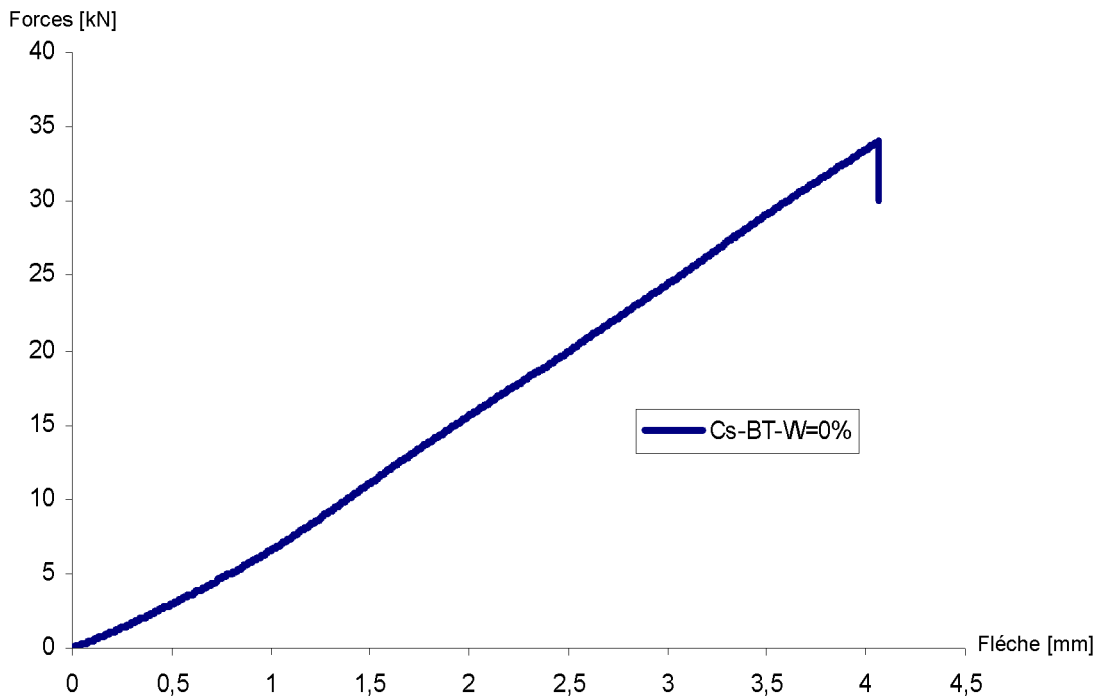
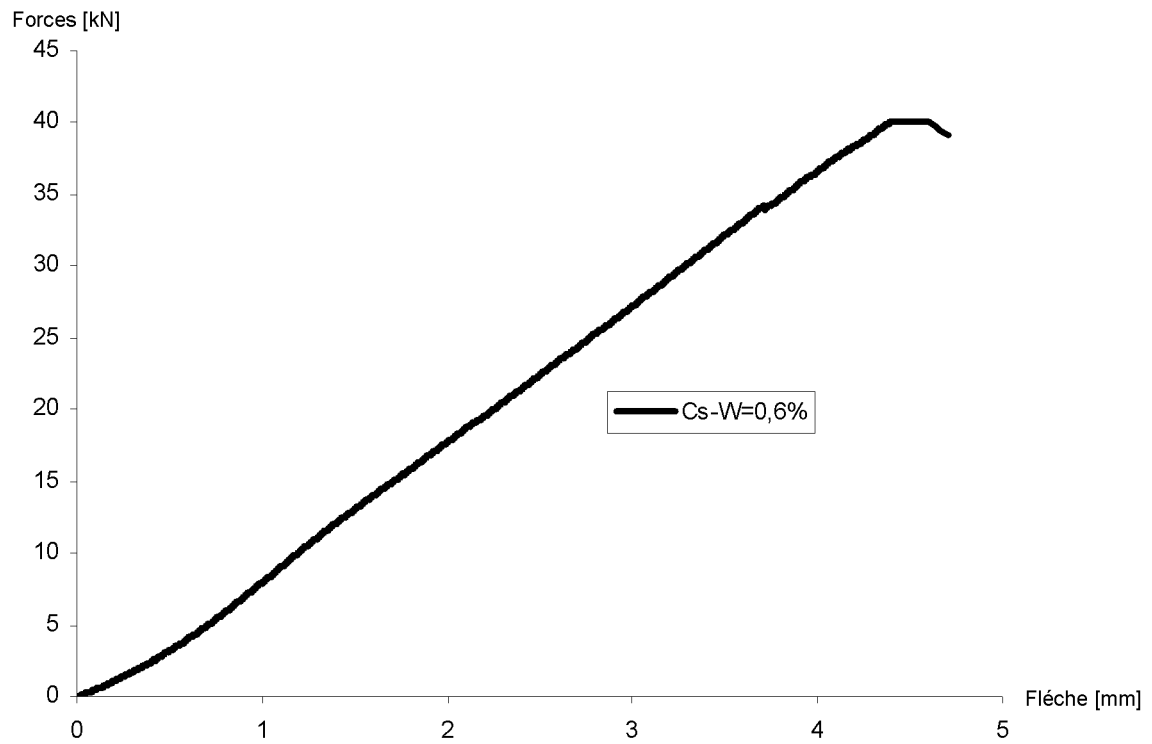
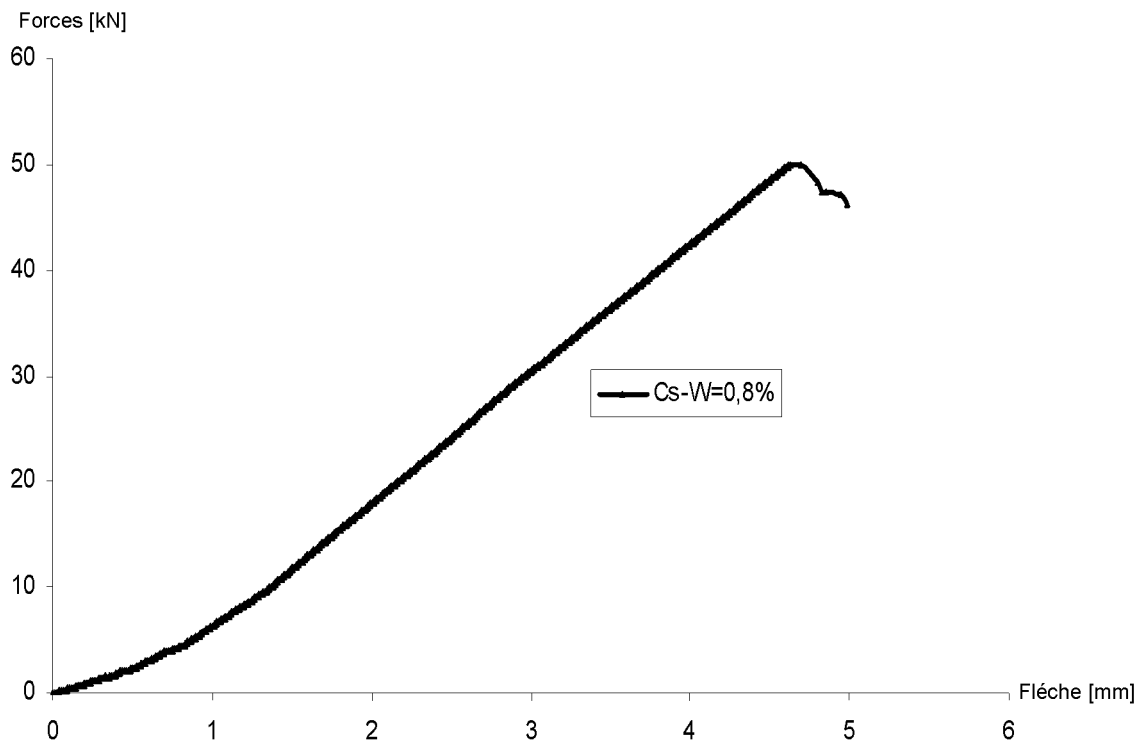


Figure IV.20 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.

Figure IV.21 Courbe moyenne force-flèche pour $W=0,6\%$.Figure IV.22 Courbe moyenne force-flèche pour $W=0,8\%$.

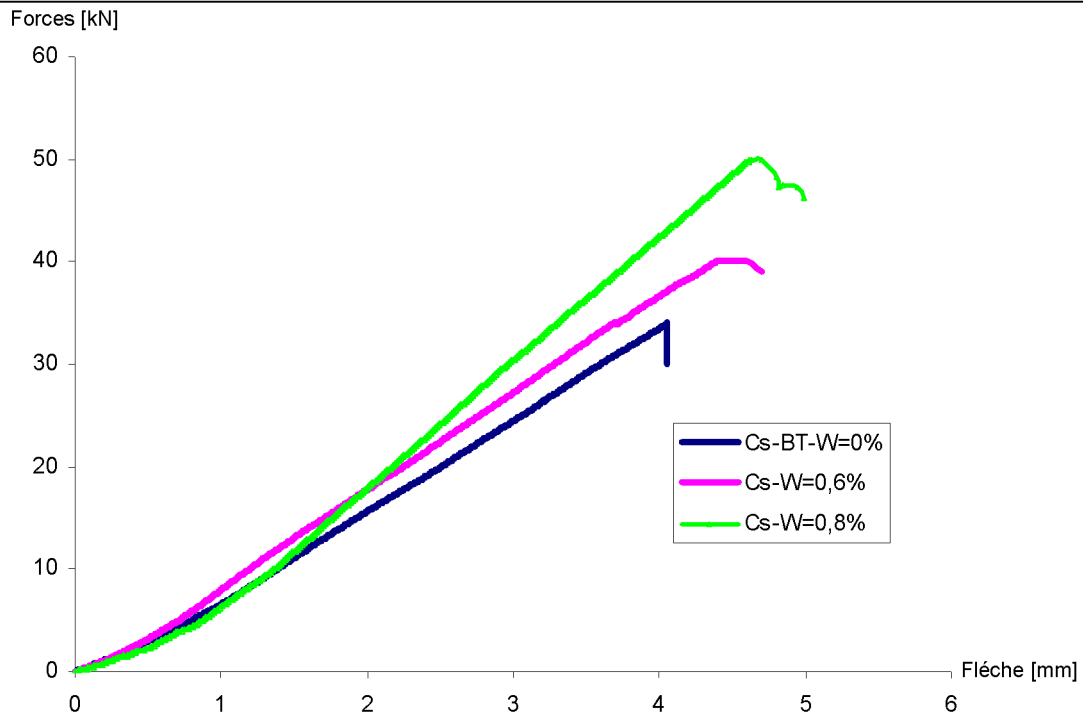


Figure IV.23 Superposition des Courbes moyenne force-flèche pour BT $W=0,6\%$, $W=0,8\%$.

Les résultats présentés par la figure (IV.23), obtenues par la série d'essais en flexion 4-points effectués, sur des poutres prismatiques de dimensions [10x20x120] cm en béton armé renforcées de fibres longues « déchets d'usinage des pièces en acier » à fin d'étudier le comportement mécanique au cisaillement (résistance à l'effort tranchant) nous ont permis de constater :

Ces résultats de figure (IV.23), qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche des poutres testées, pour les teneurs en fibres, $W=0,8\%$, $W=0,6\%$ et le béton témoin BT (sans fibres), ainsi que d'après le mode de rupture de ces poutres testées (figure VI.18 et IV.19) lors des d'essais en flexion 4-points. On a constaté que la rupture des poutres testées (voir figure VI.18 et IV.19), est une rupture par cisaillement (effet de l'effort tranchant), caractérisée par des fissures diagonales à 45° , ce qui explique une rupture par cisaillement pour la série d'essais.

D'après les résultats de cette série d'essais (figure IV.23) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche pour les teneurs en fibres $W=0,8\%$ et $W=0,6\%$ ainsi que le béton témoin BT (sans fibres), il apparaît que l'ajout de fibres longues (déchets d'usinage des pièces en acier) dans le béton améliore la résistance et la rigidité pour une teneur $W=0,8\%$ par rapport $W=0,6\%$ et le BT ($w=0\%$) au cisaillement et lui confère une ductilité significative.

Ces résultats de la figure (figure IV.23), nous ont permis de constater aussi que l'effort de rupture des poutres avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F=50\text{KN}$) est augmenté d'environ 47.5 %, par rapport aux poutres sans fibres (BT) ($F=33,9\text{KN}$). Par contre la déformation (fléché) est augmentée d'environ 26.83 %.

VI.6 Conclusions

Cette étude expérimentale menée sur des poutres renforcées des fibres de récupération « fibres longues», afin de suivre le comportement en flexion et en cisaillement (résistance à l'effort tranchant), nous a permis de conclure d'après les résultats obtenues :

L'ajout des fibres longues (déchet d'usinage des pièces en acier) confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin (sans fibres), dont on a obtenu des ruptures ductiles au lieu de fragile.

Ces résultats expérimentaux nous ont permis de constater aussi que les fibres de récupération ont augmenté la résistance et la rigidité en flexion et en cisaillement des poutres. Une teneur en fibre $W=0,8\%$ est meilleure que la teneur en fibre $W=0,6\%$ et le béton témoin BT (les poutres sans fibres).

Nous pouvons noter également qu'à partir de cette étude expérimentale, la rupture des poutres avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ est augmentée d'environ 47.5 % par rapport aux poutres sans fibres (BT). Par contre la déformation (flèche) est augmentée d'environ 26.83 %. De plus, elles confèrent au matériau une résistance résiduelle post rupture (ductilité).

CONCLUSION GENERALE

Le béton armé de fibres métalliques présente des caractéristiques mécaniques lui permettant une utilisation industrielle dans le domaine de la construction et des travaux publics. L'évolution de la réponse de ce matériau à des sollicitations de traction le rend particulièrement intéressant. Parmi les facteurs influençant son comportement en traction on peut noter :

- La géométrie des fibres utilisées.
- L'adhérence fibres - matrice de béton.
- Le pourcentage des fibres
- L'orientation des fibres.

Devant ce fait, cette étude expérimentale a été menée dans le but de saisir et comprendre l'impact ou l'effet que peut avoir l'introduction des fibres longues « issues des déchets d'usinage des pièces en acier », sur le comportement du béton qui est caractérisé par des essais de caractérisation du comportement mécanique des fibres ondulées, des essais de flexion et de cisaillement « rupture à l'effort tranchant », tout en faisant varier le pourcentage en volume des fibres W (0,6%, et 0,8%) , que des bétons témoins ainsi par conséquent nous avons constaté ce qui suit :

La méthode dite « Dreux-Gorisse », nous à permis de déterminer la composition du béton utilisée dans cette étude.

Les essais réalisées à fin de caractériser le comportement mécaniques des fibres nous ont permis de déterminer la résistance en traction des fibres utilisées. Il apparaît que la meilleure résistance est de l'ordre $R_m=160\text{MPa}$.

Pour les essais réalisées sur des poutres renforcées de fibres longue « déchets d'usinage des pièces en acier », à fin de suivre leur comportement en flexion et au cisaillement « rupture à l'effort tranchant ». Les résultats des essais effectués en flexion et au cisaillement montrent que l'ajout des fibres longues confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin BT (sans fibres), dont on à obtenus des ruptures ductiles au lieu de ruptures fragiles.

Ces résultats expérimentaux nous ont permis de constater aussi que les fibres de récupération (fibres longues), ont augmenté la résistance et la rigidité en flexion et en cisaillement des poutres. Une teneur en fibre $W=0,8\%$ est meilleur que la teneur en fibre $W=0,6\%$ et le béton témoin BT (les poutres sans fibres).

Les résultats en flexion, nous ont permis de constater aussi que l'effort de rupture des poutres avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F= 11,31$ KN) est augmenté d'environ 41 %, par rapport aux poutres sans fibres (BT) ($F=8.03$ KN). Par contre la déformation (fléché) à mi travées est augmenté d'environ 64%, et ça s'explique par le nombre de fibres important qui traverse la zone de rupture des poutres testées (voir figure IV.8).

Les résultats en cisaillement, nous ont permis de constater aussi que l'effort de rupture des poutres avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F=50$ KN) est augmenté d'environ 47.5 %, par rapport aux poutres sans fibres (BT) ($F=33,9$ KN). Par contre la déformation (fléché) est augmentée d'environ 26.83 %.

Le travail présenté dans cette étude nécessite comme tout projet, des raffinements afin de pouvoir obtenir d'autres résultats importants et de tirer des conclusions encore plus précises, c'est-à-dire le renforcement du béton avec le même type de fibres, en prenant en considération les conclusions tirées de cette étude à fin d'voir des résultats meilleurs.

Les perspectives envisagées dans ce contexte sont :

- A fin d'améliorer les résultats obtenus sur le béton renforcé avec ce type de fibres « déchets d'usinage des pièces en acier » partir de cette étude expérimentales. On s'intéressant à certains paramètres tel que :
- Réaliser des essais avec des fibres plates que ondulées à fin de diminuer les vides (cavités) dans la pâte cimentaire qui permettra d'avoir une meilleure adhérence (fibres + béton), vu que le plus gros granulats utilisées dans cette composition du béton de diamètre [$\phi=8/15$] ne rentre pas entre les ondulations des fibres.
- Le dosage des fibres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] GILLE CHANVILLARD., « Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'aciers tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire », études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série ouvrage d'art OA12, 1993.
- [2] BERNIER G., « Caractérisation et contrôle des bétons renforcés de fibres », Annales de L'I.B.T.P. N° 494 série béton, Juin 1991.
- [3] EDINGTON J., HANNANT., « Steel fiber reinforced of compacting by vibration », mat et const 5, n°25, janvier-février 1972.
- [4] EL HACHEM M., « Etude de l'influence de la fibre de fonte sur le fluage et le retrait du béton », Thèse de docteur de l'E.C.P. février 1990.
- [5] JONSTON C.D., « Propeties steel fiber reinforced portar and concret », Proceedings of the symposium on fibrous held. In LONDON, 1980.
- [6] KRENCKEL H., « Fiber reinforced brittle matrix materials », A.C.I. International symposium, sp 44.3 USA 1987.
- [7] PAILLERE MME., « Le béton de fibres métalliques état actuel des connaissances », Annales de L'ITBTP N° 515, 1993.
- [8] ABSI E., « Béton de fibres, synthèse des études et des recherches réalisées au CEBTP », Annales de l'ITBTP N°520, 1994.
- [9] ZHAN Z., « Contribution au dimensionnement des pieux en béton de fibres », Thèse de Doctorat, Université d'orléans. Nov. 1991.
- [10] ROSSI P., « Formulation du comportement mécanique du béton de fibre métallique (BFM) », Annales de l'I.T.B.T.P n°492. mars- Avril 1991.
- [11] EDINGTON J., AL., « Steel fiber reinforced concrete », G.B. Building Res.Est ; Curent. Paper 63/74. 1974.
- [12] PAILLERE A.M., SERRANO J.J., « Utilisation de la conductivité des fibres métalliques dans le traitement thermique des bétons frais et dans le chauffage des bétons durcis », Bulletin de liaison du LCPC N° 113, 1981.

- [13] JALLIL W., DESTREE X., VANDWALLE M., « Béton renforcé de fibres, applications aux dallages Industriels », annales de L'TBTP N° 522, 1994.
- [14] SYDNEY FURLAN JR ET JOÃO BENTO DE HANAI., « Shear Behaviour of Fiber Reinforced Concrete Beams », Cement and Concrete Composites 19 (1997) 359-366.
- [15] LIM D.H ET OH B.H., « Experimental and theoretical investigation on the shear of steel-fibre reinforced concrete beams », Engineering Structures 21 (1999) 937–944.
- [16] ROBERTS T.M ET HO N.L., « The international Journal of Cement Composites and Lighthweight Concrete », Volume 4, Number 3, August 1982.
- [17] BATSON G., JENKINS E AND SPATNEY R., « Steel fibres as shear reinforcement in beams », Journal, American Concrete institute, Proceedings, Vol 69, No 10, October 1972; pp 640-644.
- [18] KANI G.N.J., « Basic facts concerning shear failure », Journal, American Concrete Institute, Proceedings, vol 63, No 6, June 1966: PP 675-692.
- [19] MANUEL R.F., « Failure of deep beams », Publication SP-42, Shear in Reinforced Concrete, Vol 2, paper 19, American Concrete Institute, Detroit 1974 : pp 425-440.
- [20] Ahmed S.H., Xie Y & Yu T., « Shear Ductility of Reinforced Lightweight Concrete Beams of Normal Strength and High Strength Concrete », Cement & Concrete Composites 17 (1995) 147-159.
- [21] STRATFORD T., BURGOYNE C., «Shear analysis of concrete with brittle reinforcement», Journal of composites for construction, ASCE, Novembre 2003.
- [22] BOUAFIA Y., ADJRAD A., « Utilisation des fibres locales pour renforcement du béton », Séminaire national de génie civil., Université de M'sila (Algérie), 16 et 17 novembre 1997.
- [23] CASANOVA P., ROSSI P., SCHALLER I., « Les fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans les poutres en béton armé », Bulletin de liaison, LCPC, n° 195, janvier 1995.

- [24] KACHI M.S., « Calcul non linéaire jusqu'à rupture, d'une section en béton armé de fibres métalliques »., Thèse de magister, université MMTO, 1997.
- [25] BOUAFIA Y., FOURE B., KACHI M.S., « Relation effort ouverture des fissures dans le cas du béton armé de fibres d'acier »., Annales de L'ITBTP N^o2 , 1998.
- [26] CASANOVA P., ROSSI P., LEMAOU F., « Calcul en flexion et caractérisation des bétons de fibres métalliques »., Annales de L'ITBTP N^o530, 1995.
- [27] CHANH NV., « Steel fiber reinforced concrete »., Faculty of Civil Eng Ho Chi Min City University of Technology 2004;108–16.
- [28] DREUX G., ET FESTA J., « Nouveau guide de béton et de ses constituants ». Edition EYROLLES. 7^{ème} Edition 1995.
- [29] BOUAFIA Y., « Résistance à l'effort tranchant des poutres en béton à précontrainte extérieure. Etude expérimentale et calcul à la rupture»., Thèse de doctorat ECP, 1991.
- [30] DEHOUSSE N., LEJEUNE A., KUYKENS T., « Les mortiers et bétons renforcés de fibres d'acier »., Bruxelles. C.S.T.C. Revue n^o2, 1974.
- [31] JEJCIC O., ZANGHLLINE F., « Mortier et ciment armés de fibres »., Une étude bibliographique, Annales de L'I.T.B.T.P. suppl. n^o 347 série matériaux 51, pp. 46-87 1977.
- [32] CUYKENS T., VESTERMANS J., « Béton renforcé des fibres en acier». Extrait de C.S.T.C.-revue, n^o3, Septembre 1977.
- [33] ATLAOUI Djemel , thèse doctorat « Influence des fibres de récupération sur le comportement du béton armé»2014
- [34] CHAFI Nardjes , thèse doctorat« Matrice cimentaire renforcée de fibres Valorisation des sous produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois)2006
- [35] BOULEKBACHE Bensaid, thèse doctorat « Etude des bétons de fibres métalliques avec référence aux propriétés rhéologiques et de ductilité sous sollicitations de : compression, fendage, cisaillement et flexion »2009.
- [36]Naaman A.E., (2006), "Fiber reinforced concrete : State of progress at the Edge of the millennium", 9th International Conference on Concrete Engineering and Technology, Kuala

Lumpur, Malaysia, May 8-13 2006, pp. 20-48.

[37] Rossi P., Harrouche N., Lemaou F., (1989), "Comportement mécanique des bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et en béton précontrainte", *Annales de l'ITBTP, série matériaux* 73, décembre 1989, N° 479 bis, pp. 166-183.

RESUME

Les fibres en acier sont de plus en plus utilisées pour le renforcement du béton, notamment dans le cas des éléments minces. Elles remplacent ou complètent les armatures classiques selon le type de structure. Dans le cas des dallages (éléments minces) et du béton projeté (voûtes), on observe un gain de productivité.

Dans le but d'étudier et de comprendre l'effet que peut avoir des fibres longues sur le comportement du béton, nous avons mené une étude expérimentale sur des éprouvettes armées de ces fibres longues. Les fibres en question proviennent des déchets d'usinage des pièces métalliques (recueillis chez l'entreprise nationale des véhicules industrielles [*SNVT*]).

Une étude de caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres ondulées, sous sollicitations statiques (traction uni axiale) à été menée a fin de déterminer la résistance maximale à la rupture de la fibre et à l'arrachement).

La composition du béton est déterminée par la méthode expérimentale dite « Dreux-Gorisse ».

Le comportement mécanique de ce matériaux est caractérisé par des essais de [flexion, cisaillement], pour un béton témoin BT (sans fibres) et pour les teneurs en fibres retenues pour cette étude ($W=0,6\%$ et $W= 0,8\%$).

Les résultats obtenus, comparativement au béton témoins BT (sans fibres), sont encourageants.

Mots clés : fibres longues / caractérisation / traction directe /mode de fissuration /flexion/ cisaillement/ résistance/ effort tranchant/ductilité.

TABLE DES MATIERES

PAGE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-TECHNOLOGIE DU BETON ARME DE FIBRES	3
I.1.1 Introduction	3
I.1.2 Définition du Béton	3
I.1.3 Définition du Béton armé de fibres	4
I.1.4 Rôle des fibres dans le béton	4
I.1.5 Fabrication des bétons de fibres.....	5
I.2 Applications du béton armé de fibres	5
I.2.1 Introduction :	5
I.2.2 Quelques sites d'application et l'intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton.....	6
I.2.2.1 Canalisation et coques minces faiblement sollicitées.....	6
I.2.2.2 Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés et tous les éléments structuraux soumis à la flexion :	6
I.2.2.3 Eléments structuraux soumis à la compression : (poteaux, pieux, fondation ... etc)	6
I.2.2.4 Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles.....	7
I.2.2.5 Structures soumises à des sollicitations combinées :	7
I.2.2.6 Travaux routiers	7
I.2.2.7 Béton projeté	7
I.2.2.8 Ouvrages hydrauliques	8
I.2.2.9 Structures anti-explosives	8
I.2.2.10 Eléments préfabriqués	8
I.2.2.11 Poutres, linteaux, consoles	9

I.3 Formulation du béton de fibres.....	9
I.4 Les différents types de fibres.....	9
I.4.1 Les principaux types de fibres	9
I.4.1.1 Les fibres non métalliques	10
I.4.1.2 les fibres métalliques utilisées.....	10
I.4.2 Les différents types de fibres couramment utilisées en Europe.....	11
I.5 Les qualités indispensables des fibres.....	12
I.6 La maniabilité des bétons des fibres	12
I.7 Optimisation du béton de fibres (BFM) par la méthode Baron Lesage.....	12
I.8 Influence des fibres noyées dans le béton	15
I.8.1 Influence du pourcentage des fibres.....	15
I.8.2 Influence de l'orientation des fibres	16
I.8.3 Traitement thermique du béton frais et chauffage du béton durci par effet Joule	17
I.9 Propriétés PHYSIQUES ET mécaniques des bétons armés de fibres	18
I.9.1 Géométrie de la fibre.....	18
I.10 Comportement en flexion et A L'effort TRANCHANT « cisaillement » des bétons armés et des bétons armés de fibres	20
I.10.1 Introduction.....	20
I.10.2 Essais de l'université de São Paulo Brazil.....	21
I.10.3 Essais de l'université de South Korea	26
I.10.4 Travaux de T.M. Roberts et N. L. H	30
I.10.5 Essais de l'université North Carolina state Etats-Unis (USA)	34

DEUXIEME PARTIE: ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION	41
CHAPITRE II : CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES FIBRES ONDULEES EN SPIRALES ISSUES DES DECHETS D'USINAGE DES PIECES EN ACIER.	
II.1 Introduction.....	42

II.2 Etude expérimentale	42
II.2.1 Géométrie de la fibre et système d’ancrage	42
II.2.2 Appareillage et essai	44
II.2.3 Présentation des résultats	44
II.4 Conclusion	48

CHAPITRE III : ETUDE DE LA COMPOSITION DU BETON

III.1.1 Introduction	49
III.1.2 Les liants :	49
III.1.3 Les sables :	49
III.1.4 Les granulats	51
III.1.5 Les adjuvants et additifs.....	52
III.1.5 .1 Les adjuvants	52
III.1.5 .2 Les additifs	52
III.1.6 Rôle des différents éléments constituant le béton.....	52
III.2 Analyse granulométrique.....	52
III.2.1 Principe de l’essai :	53
III.2.2 Equipements utilisés	53
III.2.3 Description de l’essai.....	54
III.2.4 Module de finesse	57
III.3 Composition de béton par la méthode de Dreux-Gorisse :	57
III.3.1 Résistance visée.....	57
III.3.2 Dosage en ciment et eau :	57
III.3.3 Dosage des Granulats.....	60

CHAPITRE IV : ETUDE DU COMPORTEMENT EN FLEXION ET AU CISAILLEMENT DU BETON RENFORCEE PAR DES FIBRES LONGUES.

IV.1 INTRODUCTION	63
-------------------------	----

IV.2 Géométrie et composition des poutres testées :.....	63
IV.2.1 Géométrie.....	63
IV.2.2 Mise en œuvre des poutres renforcées des fibres longues.....	65
IV.2.3 Composition des éprouvettes.....	65
IV.2.4 Appareillage et essais	66
IV.3 Description des essais.....	67
IV.4 Essais de flexion 3-points.....	67
IV. 4.1 Présentation des résultats et discussions.....	68
IV.4.2 Résultats des essais flexion 3- points	68
IV.5 Essais de rupture a l'effort tranchant (flexion 4-points):	72
IV. 5.1 Présentation des résultats et discussions.....	73
VI.5.2 Résultats des essais de rupture à l'effort tranchant	73
VI.6 Conclusions.....	79
 CONCLUSION G E N E R A L E	 80

CHAPITRE I.

Figure I.1 Rôle des fibres dans une matrice [7].	5
Figure I.2 Différents types de fibres métalliques[a,b,c,et d] [36].	11
Figure I.3 Différents types de fibres utilisées[33].	11
Figure I.4 Détermination du rapport S/G optimal [10].	13
Figure I.5 Variation de la maniabilité du béton de fibres en fonction du rapport S/(S+G) (Ecoulement au maniabilimètre LCL) [10].	14
Figure I.6 Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône d'ABRAMS [19].	15
Figure I.7 Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'éclatement L/D [11].	15
Figure I.8 Effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [14].	16
Figure I.9 Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturation [9].	17
Figure I.10 Diagramme d'essai d'une dalle Conventionnelle sans renforcement par fibres d'acier [13].	19
Figure I.11 Diagramme d'essai d'une dalle de béton, sous charge ponctuelle renforcée de 20 kg/m ³ de fibres d'acier EUROSTEEL [13].	19
Figure I.12 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90 ⁰ , 2 ondulations) [1].	20
Figure I.13 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90 ⁰ , 3 ondulations) [1].	20
Figure I.14 (a) Géométrie, (b) Renforcement des poutres série A, (c) Renforcement des poutres série B [14].	22
Figure I.15 Position et nombres de jauges installées [14].	22
Figure I.16 Vue des poutres série A après les essais [14].	23
Figure I.17 Vue des poutres série B après les essais [14].	23

Figure I.18 Force- Flèche des poutres série A [14].	24
Figure I.19 Force- Flèche des poutres série B [14].	24
Figure I.20 Déformations dans les étriers aux points E3-E4 [14].	24
Figure I.21 Déformations dans les armatures longitudinales aux points A3-A4 [14].	25
Figure I.22 Dispositif d'essai des poutres testées [15].	27
Figure I.23 Comparaison des différentes résistances relatives en fonction des teneurs en fibres [15].	27
Figure I.24 Mode de fissuration pour les différentes poutres testées [15].	28
Figure I.25 Courbe charge-flèche pour les Poutres sans étriers [15].	28
Figure I.26 Courbe charge-flèche pour les poutres avec 50% des étriers conventionnels [15].	28
Figure I.27 Résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].	29
Figure I.28 Résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].	29
Figure I.29 Détails de chargement des poutres testées [16].	31
Figure I.30 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=24$ [16].	31
Figure I.31 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=16$ [16].	32
Figure I.32 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=8$ [16].	32
Figure I.33 Rapport du moment théorique/ moment à la rupture en fonction de rapport à a/d [16].	33
Figure I.34 Description des poutres testées en béton normale et à haute résistance [20].	36
Figure I.35 Dispositif d'essais utilisée [20].	36
Figure I.36 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé léger avec armatures transversales [20].	37
Figure I.37 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé à haute résistance avec armatures transversales [20].	38
Figure I.38 Effet de la résistance du béton sur la flèche à mi-travée pour un béton léger sans armatures transversales [20].	38
Figure I.39 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger [20].	39
Figure I.40 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger à haute résistance [20].	39

Figure I.41 Effet de la résistance du béton en compression sur la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger [20].....	40
---	----

CHAPITRE II.

Figure II.1 Vue des fibres longues.	43
Figure II.2 préparation du système d'ancrage dans le moule à l'aide de la résine.	43
Figure II.3 Vue de dispositif d'essai.....	44
Figure II.4 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de d'essai 01.....	45
Figure II.5 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de d'essai 02.....	45
Figure II.6 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 03.....	46
Figure II.7 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 04.....	46
Figure II.8 Contrainte- Déformation $\sigma=f(\epsilon)$ de l'essai 05.....	47
Figure II.9 Superposition des courbes $\sigma = f(\epsilon)$ pour les 05 essais réalisés.	47

CHAPITRE III.

Figure III .1[SABLE 0/3].....	50
Figure III .2 [GRAVIER3/8].....	51
Figure III .3[gravier 8/15].....	51
Figure III.4 Courbe Granulométrique.....	56
Figure III.5 Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de L'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	62

CHPITRE IV.

Figure IV.1 : fibres utilisées avant étirassions.....	63
Figure IV.2 : une partie d'une fibre utilisée de longueur L=10cm	64
Figure IV. 3 Moules prismatiques et fibres longues utilisées ainsi que le vibreur.	64
figure IV.4 : disposition des fibres et le béton pour une hauteur des poutres H=20cm.	65

Figure IV.5 Vue du dispositif d'essai « Ibertest ».....	66
Figure IV.6 Schéma statique de l'essai de flexion 3- points.....	67
Figure IV.7 Exemple d'essai flexion 3-points.	68
Figure IV.8 Exemple du mode de rupture des poutres lors des essais flexion 3-points.....	68
Figure IV.9 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.....	69
Figure IV.10 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,6%.	70
Figure IV.11 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,8%.	70
Figure IV.12 Superposition des Courbes moyennes force-flèche pour BT, W=0,6% et W=0,8%.....	71
Figure VI.13 Schéma statique de la série d'essais en flexion 4- points.	72
Figure IV. 14 Exemple d'essai flexion 4-points.	73
Figure IV.15 Début d'ouverture de fissure diagonale pour une force F= 80.68 KN.	73
Figure IV.16 Ouverture de fissure diagonale pour une force F= 86.78 KN.	74
Figure IV.17 Ouverture de fissure diagonale pour une force F= 94.03 KN.	74
Figure VI.18 Mode de rupture des poutres testées lors des essais de rupture a l'effort tranchant pour une teneur en fibre w=0,8%.....	75
Figure VI.19 Mode de rupture d'une poutre testée montre les bords de la fissure qui sont reliés par les fibres.....	75
Figure IV.20 Courbe moyenne force-flèche pour BT- W=0%.....	76
Figure IV.21 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,6%.	77
Figure IV.22 Courbe moyenne force-flèche pour W=0,8%.	77
Figure IV.23 Superposition des Courbes moyenne force-flèche pour BT W=0,6%,W=0,8%.....	78

LISTE DES TABLEAUX.

	PAGE
Tableau I.1 Caractéristiques du mélange des poutres testées [14].....	21
Tableau I.2 Caractéristiques des aciers et fibres utilisées [15].	26
Tableau I.3 Détails des spécimens des poutres testées [16].....	30
Tableau I.4 Caractéristiques des poutres testées [20].....	35
Tableau I.5 Charges (ultime) et type de rupture des poutres testées [20].....	37
Tableau III.1 Analyse granulométrique du sable.	54
Tableau III.2 Analyse granulométrique pour le gravier (3/8).....	55
Tableau III.3 Analyse granulométrique pour le gravier (8/15).....	55
Tableau III.4 Valeurs approximatives du coefficient granulaire	58
Tableau III.5 Constituants du béton pour un volume de 1 m ³	61
Tableau III.6 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m ³ de béton.....	62
Tableau IV.1 Compositions optimisées pour 1 m ³ de béton et pour une éprouvette [10x20x120] cm. .	65
Tableau IV.2 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m ³ de béton et pour une éprouvette prismatique [10x20x120] cm.	66
Tableau IV.3 : forces à la rupture en flexion	69
Tableau IV.4 : forces a la rupture des poutres testées	76

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau dont les performances en traction sont faibles par rapport à celles en compression. Pour l'utilisation efficace d'un tel matériau, il a été nécessaire de le renforcer par des aciers qui reprennent les efforts de traction : le béton armé. Le renforcement de la zone tendue du béton par des armatures en acier a permis le développement de ce matériau dans le bâtiment et les travaux publics. Cette solution, outre toutes ses qualités (résistance, formulation relativement simple, facilité de mise en œuvre...), présente néanmoins deux inconvénients : ce matériau est fortement hétérogène et son comportement en traction reste du type fragile. De plus, sa mise en œuvre se heurte parfois à la complexité du ferrailage.

Par consensus, les bétons de fibres métalliques ne peuvent substituer aux bétons armés traditionnels. Toutefois, des chercheurs ont proposé de les associer aux bétons armés et donc remplacer partiellement les armatures traditionnelles tel que : le remplacement des armatures transversales (CHANVILLARD. G) [1]. Les efforts ainsi déployés ont permis d'envisager l'utilisation des propriétés des BFM (Béton de fibres métalliques) pour remplir des tâches bien précises telles que : Réparations des revêtements routiers, les domaines des dallages industriels, les pistes d'aérodromes, les murs de soutènement, ce béton peut aussi être utilisé pour augmenter la résistance au feu du béton armé car les fibres limiteraient les ouvertures de fissures et protégeraient ainsi les armatures traditionnelles du rayonnement thermique.

Dans la présente étude expérimentale, nous nous intéressons à des fibres « locales » pour le renforcement du béton. Ces fibres proviennent des déchets d'usinage des pièces en acier « fibres longues ». Elles sont récupérées à la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI). Leur forme géométrique et ondulée en spirales leur confère un ancrage parfait dans la matrice cimentaire.

Afin de suivre le comportement du béton armé renforcé avec ce type de fibres « fibres longues », des essais mécaniques (flexion et des essais de cisaillement (rupture à l'effort tranchant) ont été réalisés sur des machines (au Laboratoire de modélisation des matériaux et structures de génie civil à L'université M.M de Tizi-Ouzou). Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques, [10x20x120] cm pour les pourcentages (teneurs) en fibres ($W=0,6\%$ et $W=0,8\%$), ainsi que les bétons témoins BT($W=0\%$).

Avant de mener une étude expérimentale il convient d'avoir un maximum de renseignements issus de recherches déjà effectuées dans le domaine. Nous consacrons donc le premier chapitre à l'étude bibliographique.

Le second chapitre consiste en la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres utilisées, sous sollicitations statiques (Traction uni axiale), à fin de déterminer la résistance à la traction des fibres utilisées, qui permettra d'améliorer les performances mécaniques en particulier la résistance.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la composition du béton, dans laquelle on décrit la méthode dite « Dreux-Gorisse », utilisée pour le calcul des masses des composants du béton.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude du comportement en flexion et au cisaillement « rupture à l'effort tranchant » du béton de fibres. Des séries d'essais en flexion (des essais de flexion 3- points) et des essais de cisaillement « des essais flexion 4- points » sur des éprouvettes prismatiques de dimensions [10x20x120] cm ont été réalisées au laboratoire de Génie-Civil, pour suivre le comportement de ces bétons armés renforcés de ces fibres longues en flexion ainsi que au cisaillement.

Enfin, une conclusion générale termine ce travail où nous présentons les différentes remarques et suggestions pour une suite future.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-TECHNOLOGIE DU BETON ARME DE FIBRES

I.1.1 Introduction :

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage, son excellente résistance en compression, sa bonne tenue au feu et sa durabilité. Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction : des fibres qui sont naturelles ou synthétiques. Cela conduit à un matériau composite (nouveau béton). Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes pour améliorer la résistance à la traction, à la flexion ou au cisaillement d'une pièce, des recherches importantes ont été faites sur ce nouveau matériau qu'est le béton de fibres, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques et le procédé de mise en œuvre de ce matériau. Plusieurs auteurs, dont on peut citer [2, 3, 4, 5, 6,], ont permis de mettre en évidence les performances de ce composite; à savoir :

- une bonne résistance à la traction, à la fatigue et aux chocs,
- un comportement ductile après la première fissuration,
- une facilité de mise en œuvre.

L'utilisation des fibres comme moyen de renforcement du béton ne s'est pas limitée uniquement au cas des fibres d'acier. Des fibres de verre, en matière plastique, de fonte et de polypropylène ont été utilisées, notamment pour renforcer les sols.

Dans cette présente étude, on se limitera au cas des fibres métalliques qui sont les plus utilisées pour le renforcement du béton.

I.1.2 Définition du Béton :

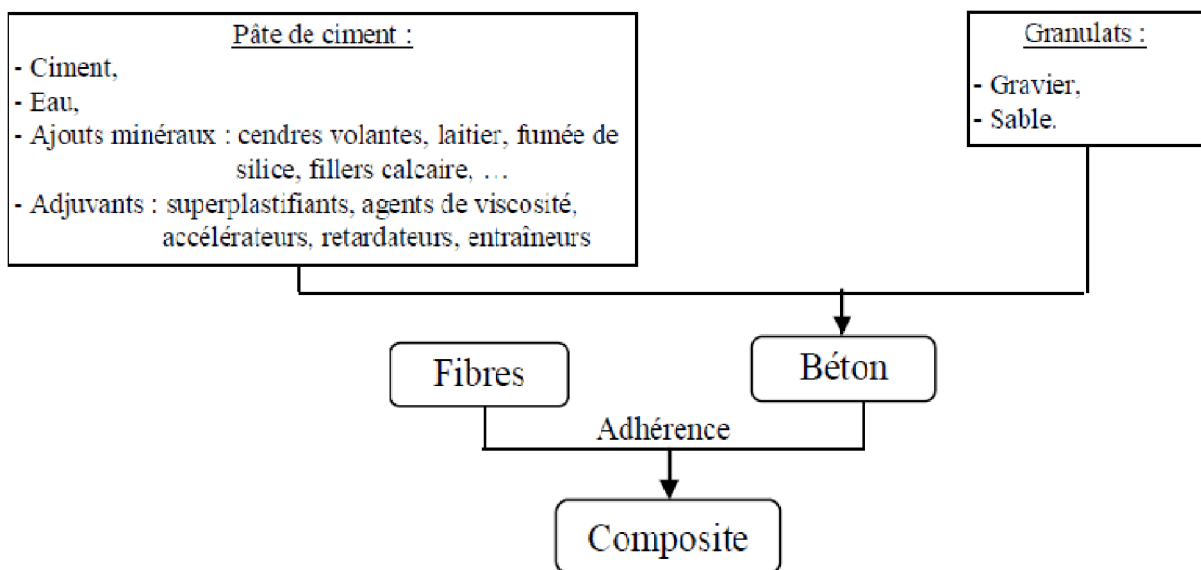
Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit.

La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I.1.3 Définition du Béton armé de fibres :

Un béton armé de fibres est un mélange contenant une répartition de fibres discontinues dans une matrice de béton traditionnel. L'ajout des fibres a pour objectif d'obtenir un matériau **composite** « isotrope » présentant une meilleure résistance à la traction, un meilleur comportement post-fissuration, de remédier ainsi à son inconvénient majeur qui est son comportement du type fragile vis-à-vis de la traction.

Modèle de composite à base de fibres [36].



I.1.4 Rôle des fibres dans le béton :

Compte tenu de toutes les recherches entreprises dans ce domaine, le rôle des fibres est défini comme étant un contrôle de la fissuration du béton en état de service en rétrécissant les fissures et donc transformer le comportement ductile qui le sécurise lors des états de chargement ultimes (voir figure I.1).

Les phénomènes tels que le retrait, les contraintes appliquées au jeune âge sont la plus part du temps ingérables et occasionnent des microfissures dans le béton. Quand on soumet le béton à un effort de traction, les lignes de tension s'infléchissent en raison de l'impossibilité de la transmission de la charge à travers les fissures ce qui explique l'accroissement des tensions aux extrémités des fissures [7]. Lors d'un essai de flexion, la faible résistance du béton est atteinte en un laps de temps, ce qui provoque la création d'une fissure qui en se propageant conduit le matériau à une rupture fragile. Toutefois, les BFM parviennent à franchir ce seuil en transmettant une partie de cette force à travers la fissure via les fibres, ce qui nous laisse penser que l'efficacité des fibres réside en leur nombre et la qualité de leur ancrage [7].

« Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de " couture " des fissures. »

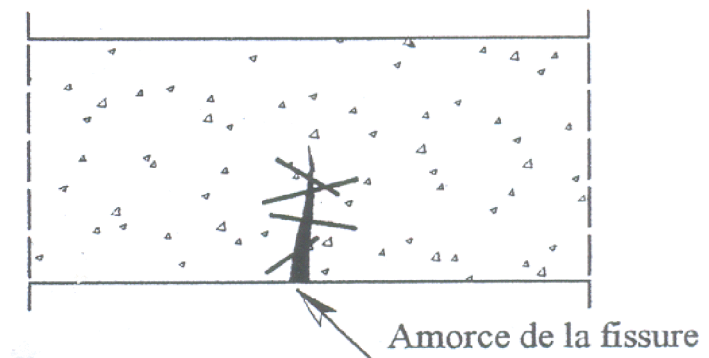


Figure I.1 Rôle des fibres dans une matrice [7].

I.1.5 Fabrication des bétons de fibres :

La nécessité de la fabrication d'un BFM fait qu'un dosage abusif des fibres à incorporer rend irréalisable le gâchage ainsi que la mise en œuvre. C'est pour quoi, et eu égard aux paramètres fondamentaux de dosage en volume, de forme et de rapport L/D qui peuvent influencer d'une part l'ouvrabilité et la mise en œuvre et d'autres part l'efficacité mécanique, une bonne mise en œuvre exige impérativement de fixer un dosage maximum en fibres à ne pas dépasser en aucun cas au détriment de l'efficacité mécanique [8].

I.2 Applications du béton armé de fibres

I.2.1 Introduction :

Depuis que le concept de béton de fibres a été connu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de fibre d'acier dans une matrice de béton permet au composite (béton de fibre) d'obtenir des propriétés très intéressantes. Mais, ce type de béton n'est pas considéré comme un substituant aux bétons ordinaires, mais comme un matériau d'un nouveau type, qui devient intéressant dans l'optique de la conception d'une structure performante.

En regardant le concept de béton des fibres, leur utilisation est naturellement orientée vers les éléments structuraux présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons conventionnels. Ceci ne veut pas dire que d'autres domaines stratégiques comme (fonderies, centrales nucléaires ... etc.) n'ont pas bénéficié de ce type de matériau. Le béton armé de fibres d'acier inoxydable a été expérimenté avec succès pour les parties exposées aux fortes variations de températures et même aux très hautes températures, en remplacement de revêtements réfractaires.

L'utilisation de ce type de matériau est facile car le matériel de chantier nécessaire est le même qui sert pour la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton routier ordinaire.

Donc, on peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres :

- 1) Le béton renforcé de fibres seules : Dans ce cas on utilise les propriétés des bétons de fibres qui seront liées à plusieurs paramètres. Ces paramètres sont généralement le type et les propriétés de matrice utilisée, type et propriétés des fibres utilisées, ainsi que la méthode de mise en œuvre retenue.
- 2) Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles : Dans ce cas on introduit les fibres dans les éléments structuraux en béton armé soumis à des sollicitations combinées afin de majorer la résistance et la rigidité des éléments concernés.

I.2.2 Quelques sites d'application et l'intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton :

I.2.2.1 Canalisation et coques minces faiblement sollicitées :

- amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges.
- modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration.

I.2.2.2 Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés et tous les éléments structuraux soumis à la flexion :

- diminution de 40 % de l'ouverture de fissures.
- augmentation de la rigidité après fissuration.
- augmentation de la résistance au cisaillement.
- augmentation de la résistance à l'usure.

I.2.2.3 Eléments structuraux soumis à la compression : (poteaux, pieux, fondation ...etc)

- amélioration de la charge ultime.
- pas de rupture catastrophique.

Exemples : Fondations

Fondations de machines

Leur résistance aux chocs, leur bonne résistance aux sollicitations dynamiques et l'isotropie des caractéristiques mécaniques des bétons armés de fibres pour reprendre des efforts d'orientation quelconque, les indiquent parfaitement pour ce type de fondation.

Fondations profondes

Pour remédier à la difficulté de mise en place des cages d'armature, le béton de fibres est utilisé afin de remplacer totalement ou partiellement les armatures traditionnelles. Dans le cas où la fondation doit résister à un fort moment fléchissant dans sa partie supérieure, des armatures traditionnelles peuvent être utilisées pour renforcer uniquement cette partie, ZHAN [9].

I.2.2.4 Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles

Exemples : Chaussées de route et pistes d'aérodrome : [31]

Grâce à une plus grande résistance à la fissuration et à la fatigue du **béton de fibres**, l'épaisseur d'une chaussée en BAF peut être la moitié environ de celle d'une chaussée en béton traditionnel, dans les mêmes conditions normales de charge.

Quelques exemples : construction de 52700 m² de chaussées de parking de l'aéroport de Las Vegas (Nevada) en BAF, avec 2 % de fibres en acier, épaisseur des chaussées 15 cm (alors qu'elle devrait être égale à 37.5 cm pour le BA traditionnel), trafics des DC 8, DC10 et Boeing 747 ; 33400 m² de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de Fallon (Nevada), 2 % de fibres acier, épaisseur 12.7 cm ; Pistes de l'aéroport international Tampa, USA : 1.5 % de fibres, épaisseur des pistes 10 cm et 15 cm, trafic des Boeing 727.

Donc :

- l'énergie absorbée est plus importante.
- la durée de choc est augmentée.
- loi de comportement du matériau est fortement modifiée.

I.2.2.5 Structures soumises à des sollicitations combinées :

- les majorations de résistances et de rigidités obtenues sous sollicitations simples ne se trouvent pas dans le cas du comportement sous sollicitation combinées.

I.2.2.6 Travaux routiers :

Leur bonne résistance aux chocs et à la fatigue a permis leur emploi courant dans la construction des routes et des pistes d'aéroport où les sollicitations dynamiques sont très fréquentes. La présence des fibres diminue aussi le retrait du béton.

I.2.2.7 Béton projeté :

L'emploi des fibres dans le béton projeté est souvent utilisé pour les constructions minières et la construction de tunnels ou la stabilisation des pentes. Dans ce domaine les fibres métalliques sont généralement utilisées.

I.2.2.8 Ouvrages hydrauliques :

L'utilisation du béton armé de fibres est une solution intéressante dans les cas suivants

-Les bétons mis en œuvre sous l'eau; La cohésion du béton apportée par les fibres permet la facilité de mise en œuvre.

-Les quais; la présence des fibres augmente la résistance aux chocs, au poinçonnement et à l'érosion.

-Les ouvrages ayant besoin d'une haute résistance à la cavitation.

I.2.2.9 Structures anti-explosives

D'après T. CUYKENS [32], les contraintes de cisaillement sont mieux reprises, la cohésion après fissuration, la résistance aux chocs, aux chocs thermiques et au fendage sont accrues par l'utilisation des fibres en acier combinées avec des armatures traditionnelles, ce qui rend intéressante l'utilisation de tels bétons dans :

- Les enceintes nucléaires.
- Les constructions de protection (par exemple les réacteurs nucléaires, les réservoirs).
- Le remplissage des joints entre éléments préfabriqués.

I.2.2.10 Eléments préfabriqués

Les dégâts dus au transport sont limités suite à la résistance plus élevée au fendage, aux coups et à l'effritement. Pour les structures minces, les armatures exigent un recouvrement minimum de 20 mm pour limiter les risques de corrosion et de fissuration, or, celles-ci subissent rarement des efforts importants. L'utilisation des fibres permet de réduire le volume de béton, les structures sont donc plus légères, alors plus faciles à manipuler. Dans ce domaine, les fibres les plus utilisées sont les fibres de verre et de propylène. Leurs utilisations sont fréquentes pour les structures préfabriquées telles que :

- Les parois.
- Les éléments de façade.
- Les traverses de chemins de fer.
- Les couvercles de caniveaux et de puits.
- Les barrières de sécurité.
- Les dalles de trottoir.
- Les tuyaux.
- Les poteaux des éclairages publics.

I.2.2.11 Poutres, linteaux, consoles

L'emploi des fibres permet de réduire l'armature d'effort tranchant ou la supprimer. L'armature principale peut également être supprimée dans les linteaux courts, T. CUYKENS [32].

I.3 Formulation du béton de fibres :

Le manque de méthodes de formulation des bétons de fibres a toujours posé un problème, mis à part les quelques méthodes empiriques que nous propose la littérature [10] et qui, dans certains cas, débouche sur des résultats erronés. Avec l'évolution de cette technologie et pour venir en aide aux

industriels qui s'intéressent aux BFM, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) a pu établir une méthode de formulation de ces bétons courants. La particularité de cette méthode, est qu'elle nous donne la possibilité d'avoir une composition à chaque fois spécifique. Par conséquent, elle conduit à un matériau optimisé vis-à-vis des objectifs escomptés. Ainsi selon que l'on souhaite avoir un BFM maniable, résistant ou ayant une influence sur la ductilité des structures, le matériau composite conçu sera totalement distinct [10].

Les deux hypothèses dont dépend la méthode dite Baron-Lesage sont :

1. Pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C, fixe), le béton le plus maniable et le plus compact est celui qui a le squelette minéral le plus optimal.
2. Le dosage en granulats est indépendant de la nature et du volume de la pâte de ciment (eau+ciment).

Une troisième hypothèse vient se dresser pour renforcer les deux premières et assurer l'adéquation de cette méthode aux bétons de fibres métalliques dont l'énoncé est le suivant :

3. L'introduction des fibres métalliques n'influe en rien sur les deux premières Hypothèses.

I.4 Les différents types de fibres :

I.4.1 Les principaux types de fibres :

- les fibres de verre, dont la composition chimique est étudiée pour ne pas être attaquées par les alcalins du ciment, leur mise en place est assez facile à des dosages élevés. Elles sont utilisées pour les structures non porteuses. Elles ont un faible module d'élasticité.
- les fibres en fonte ductile. Elles ont une bonne adhérence.
- les fibres synthétiques, qui présentent une bonne tenue dans le temps et sont utilisées pour les dallages industriels. Les fibres de polypropylène sont recommandées dans le cas de risque d'incendie.
- les fibres de carbone dont des propriétés mécaniques sont excellentes mais présentant une mise en place difficile. Leur emploi est rarissime en raison de leur coût excessif.
- Les fibres d'aramide (kevlar), issue de la chimie organique, elles ont une bonne résistance à la traction, au choc et à la fatigue. Elles ont un prix élevé.
- les fibres naturelles (bambou, noix de coco, sisal, steppe, alfa, palmier, abaca, ...) offrent une résistance à la traction moyenne. Elles sont utilisées dans la fabrication des tuiles et dans le textile.
- les fibres métalliques qui sont les plus utilisées, du fait qu'elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques et offrent des performances importantes pour les bétons. Les fibres se divisent en deux catégories :

- Les fibres non métalliques et les fibres métalliques.

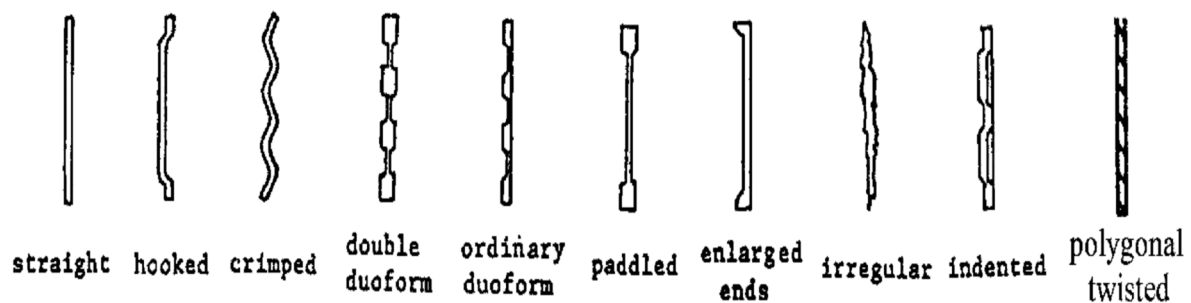
I.4.1.1 Les fibres non métalliques :

Selon le type de fibres, elles présentent des propriétés plus ou moins intéressantes et leurs applications sont limitées soit par le prix très élevé (fibres de carbone), soit par les problèmes de durabilité (les fibres de verre), soit à leurs mauvaises performances comme renfort (fibres de polypropylène). Certaines fibres naturelles présentent une instabilité dimensionnelle due soit aux cycles "séchage-mouillage". Parmi ces fibres, on peut citer les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres synthétiques et les fibres naturelles organiques ou minérales (coco, bois, amiante, bambou, Asbestos, abaca, chanvre, palmier, alfa, coton...). Les fibres végétales naturelles ne sont pas destinées pour les bétons à hautes performances.

Elles sont plutôt appliquées aux bétons ordinaires. Des fibres d'amiante ont été remplacées par les polymères pour leur effet nuisible sur la santé humaine.

I.4.1.2 les fibres métalliques utilisées :

La domination de ces fibres pour le renforcement des mortiers et des bétons vient du fait que l'acier a une bonne compatibilité avec le béton. De plus, le module d'élasticité de l'acier qui est environ sept fois plus élevé que celui du béton permet d'améliorer la ductilité du béton en mobilisant des efforts de traction dans ces fibres dès la fissuration. Ces fibres trouvent beaucoup d'applications réelles et potentielles dans le domaine du génie civil. Il existe de nombreuses variétés de fibres métalliques qui se distinguent par leur diamètre, leur section (ronde, carrée), leur limite élastique, leur longueur. Elles peuvent être rectilignes, crochetées, ondulées, tronquées, embouties ou en boucle (voir figure 1.2 [a, b, c et d]) [35,36].



(a) Formes des fibres métalliques

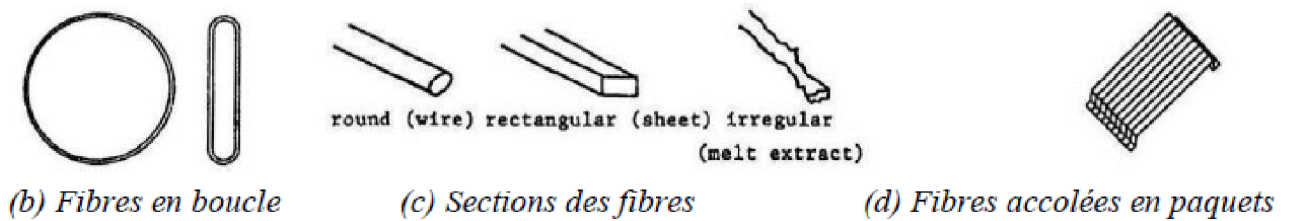


Figure I.2: différents types de fibres métalliques [a ,b ,c et d]. [36]

I.4.2 Les différents types de fibres couramment utilisées en Europe :

➤ **Fibres Dramix**

Ce sont des fibres à crochets (Figure 3); elles sont fabriquées en fil d’acier étiré à froid et ont une résistance à la traction de 1100 MPa. Pour le type standard $zc / 50 / 50$, elles ont une longueur de 50 mm et un diamètre de 0.5 mm. Elles se présentent sous forme de plaquettes de 10 à 12 fibres accolées. Lorsqu’elles sont introduites dans le béton la colle se dissout et les fibres sont réparties d’une manière aléatoire.

➤ **Fibres Eurosteel**

Ce sont des fibres ondulées sur toute leur longueur (figure I.3), en acier tréfilé avec une teneur en carbone de 0.25%. Leur résistance à la traction est de 1400 MPa et leur élongation à la rupture est de l’ordre de 14%. Il existe deux types standards :

- Eurosteel 60 / 100 (longueur 60 mm, diamètre 1 mm),
- Eurosteel 50 / 80 (longueur 50 mm, diamètre 0.8 mm).

➤ **Fibres Pont à Mousson**

Elles se présentent sous forme d’un ruban (figure I.3), de 1.5 à 2 mm de largeur et 60 mm de longueur, leur épaisseur est de l’ordre de 30 microns. Elles sont en fonte amorphe, leur résistance en traction est de 2000 Mpa.

➤ **Fibres Harex**

Les fibres Harex sont obtenues par fraisage de blocs d’acier (figure I.3), leurs dimensions sont de 32*2*0.25 mm. Elles ont une résistance de 700 MPa et un module de 200000 MPa.

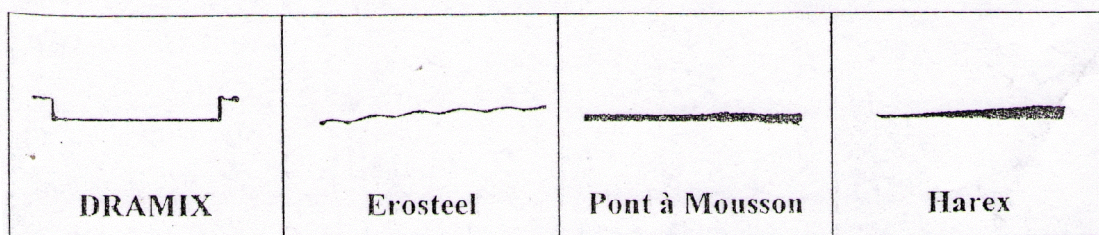


Figure I.3 Différents types de fibres utilisées[33].

I.5 Les qualités indispensables des fibres

Les qualités indispensables que les fibres doivent présenter sont les suivantes:

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment.
- Avoir une bonne résistance à la traction.
- Ne pas risqué d'être attaquées par le milieu basique du ciment.
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres.
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre.
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le coût du béton.

I.6 La maniabilité des bétons des fibres

La maniabilité d'un BFM est capitale, selon la destination, pour en faciliter la mise en œuvre.

Ainsi pour avoir une étreinte sur le contrôle de l'ouvrabilité, il faut parvenir à gérer plusieurs paramètres et dont la maniabilité est étroitement liée.

1. Le dosage en fibres et l'élancement qui sont inversement liés à la maniabilité.
2. Le même phénomène est constaté avec une quantité abusive des gros granulats.
3. La rugosité de la surface des fibres et leur géométrie amplifient le risque de formation d'oursins de fibres au sein d'une matrice cimentaire [7].

I.7 Optimisation du béton de fibres (BFM) par la méthode Baron Lesage :

L'utilisation de la méthode **Baron Lesage** consiste à suivre les étapes qui suivent :

-Nous fixons au départ le rapport eau sur ciment (**E/C**) ainsi que le pourcentage de fibres à incorporer.

-Pour chaque valeur du rapport sable granulat (**S/G**), nous prélevons la maniabilité correspondante, ainsi nous traçons la courbe temps d'écoulement en fonction du rapport S/G, des lors et compte tenu de la première hypothèse, on extrait le rapport S/G pour lequel la maniabilité est optimale (voir figure I.4).

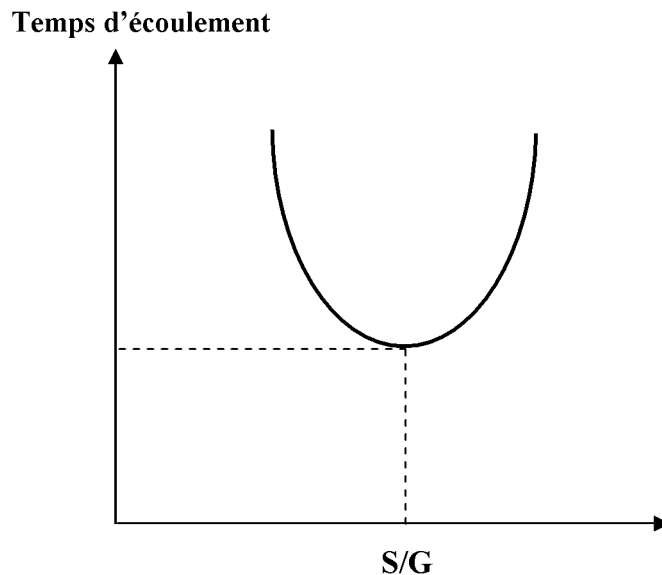


Figure I.4 Détermination du rapport S/G optimal [10].

Toutefois la maniabilité que l'on obtient en suivant le processus de cette méthode peut être différents de celle désirée, ainsi comme l'exige la deuxième hypothèse et pour remédier à cette situation paradoxale, nous pouvons jouer sur la quantité d'eau ou de ciment de telle sorte à maintenir le rapport E/C constant, ce qui nous conduira éventuellement à un mélange ayant plus de pâte de ciment.

Une recherche a été caractérisée au laboratoire central des ponts et chaussées et cela en étudiant deux types de fibres métalliques, les fibres DRAMIX collées par groupe sous forme de plaquettes et les fibres de fonte amorphe dites ponts à mousson. Cette étude portait sur l'influence de la longueur des fibres ainsi que de leurs pourcentages dans une matrice cimentaire [10].

La constatation qui a été faite est que plus est grand le pourcentage en fibres plus on doit augmenter le rapport S/G et la quantité de pâte de ciment en l'occurrence E+C (figure I.5).

Par conséquent cette observation a conduit aux déductions suivantes :

1. Il apparaît que le rôle des fibres s'apparente à celui d'un gros gravillon du squelette minéral.
2. Le béton que l'on obtient est beaucoup plus poreux pour cause d'augmenter la quantité de sable, fait qui est sensé être compensé par une quantité de pâte de ciment

en plus. Ce résultat, qui semble péjoratif, s'est révélé bénéfique pour l'assurance d'une adhérence mécanique plus ou moins parfaite entre fibres et pâte de ciment.

L'augmentation du rapport S/G ainsi que de la pâte de ciment est plus considérable pour un béton de fibres de fonte amorphe que pour un béton de fibres DRAMIX ; la raison en est simple, le phénomène est perceptible par le fait que les fibres de fonte amorphe possède une forme peu différente d'un gros gravillon que celle des fibres DRAMIX, ce qui signifie une substitution plus formelle entre fibres et gravillons.

Tous les résultats observés durant cette étude convergent vers les recommandations suivantes :

1. Fibres DRAMIX

- Le rapport S/G est pris égal à 1,075 pour un pourcentage en fibres égal à 1%.
- S/G varie entre 0,5 et 0,7 pour un pourcentage en fibres inférieur à 1% et cela pour une longueur de 60 mm.

2. Fibres de fonte amorphe

- S/G est compris entre 1 et 1,2 quand le pourcentage des fibres est entre 1,5% et 2%.
- Nous pouvons adopter une valeur du rapport S/G comprise entre 1 et 1,8 pour un pourcentage inférieur à 1%.

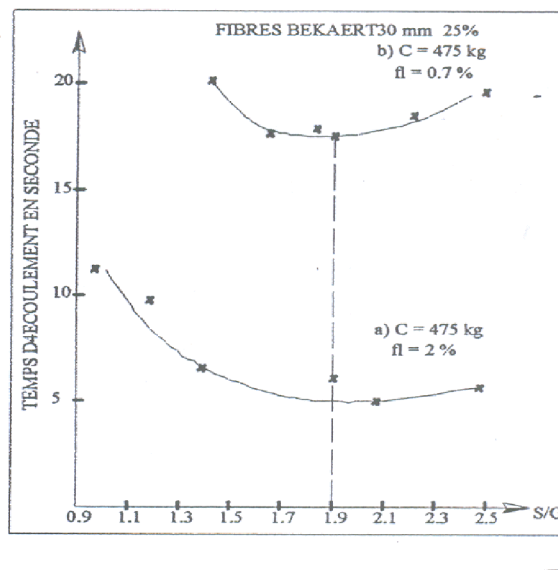


Figure I.5 Variation de la maniabilité du béton de fibres en fonction du rapport S/(S+G) (Ecoulement au maniabilimètre LCL) [10].

I.8 Influence des fibres noyées dans le béton :

I.8.1 Influence du pourcentage des fibres

Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle d'armature, contrôlent sa fissuration et lui confèrent une grande ténacité. Néanmoins l'ouvrabilité du mélange diminue avec la croissance de la teneur en fibres (figure I.6).

EDINGTON et al [11] ont montré la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres. (figure 1.6).

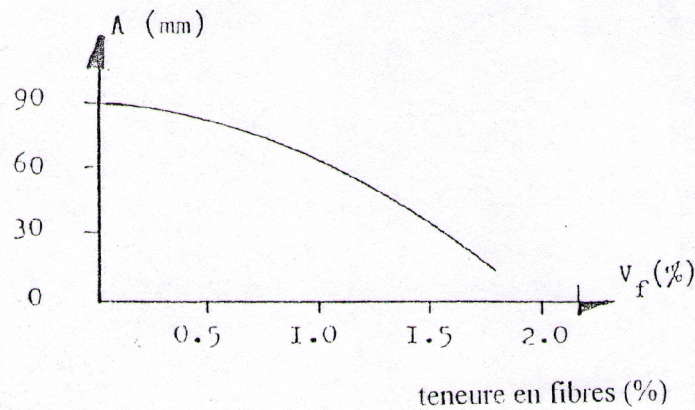
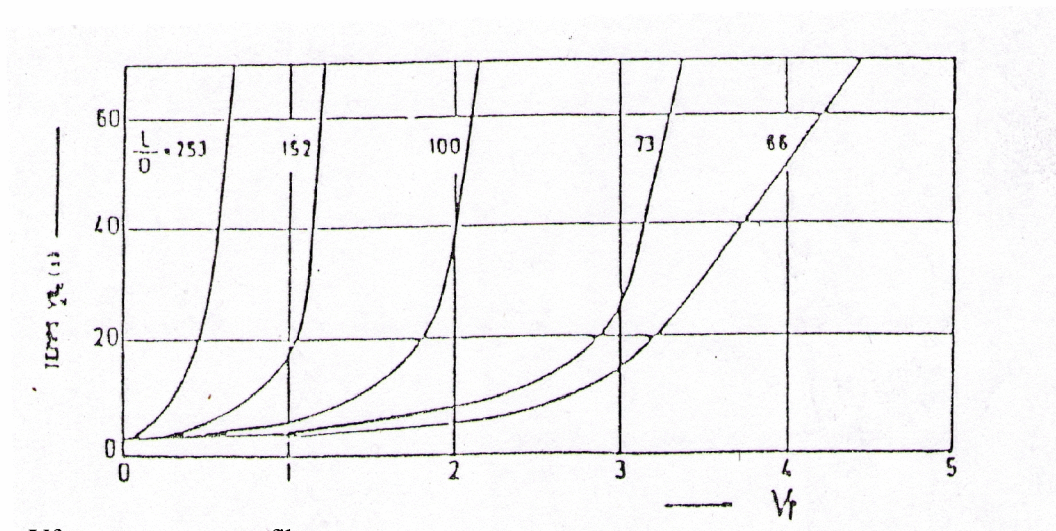


Figure I.6 Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône

EDINGTON et al [11] ont montré la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres (figure I.7).



Vf : pourcentage en fibres.

V_{eb} : Temps nécessaire pour le remoulage, dans un moule cylindrique posé sur une table vibrante, du béton démoulé du cône d'ABRAMS.

Figure I.7 Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'élanement L/D [11].

I.8.2 Influence de l'orientation des fibres

Une fibre orientée parallèlement à la direction d'application des contraintes et perpendiculairement à la direction de propagation des fissures joue l'effet le plus important, par contre une fibre perpendiculaire à celle ci n'a aucun effet.

D'après EDINGTON et HANNANT [3], la vibration du béton de fibres favorise une orientation bidimensionnelle des fibres, dans un plan horizontal, ce qui rend le matériau plus performant si cette orientation coïncide avec la direction des contraintes majeures. DEHOUSSE, LEJEUNE et KUYKENS

[30] ont montré que l'utilisation de la table vibrante provoque une orientation préférentielle des fibres, perpendiculairement au sens de la vibration.

Enfin l'étude d'EL HACHEM [4] permet de mettre en évidence l'effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite à la traction (figure I.8).

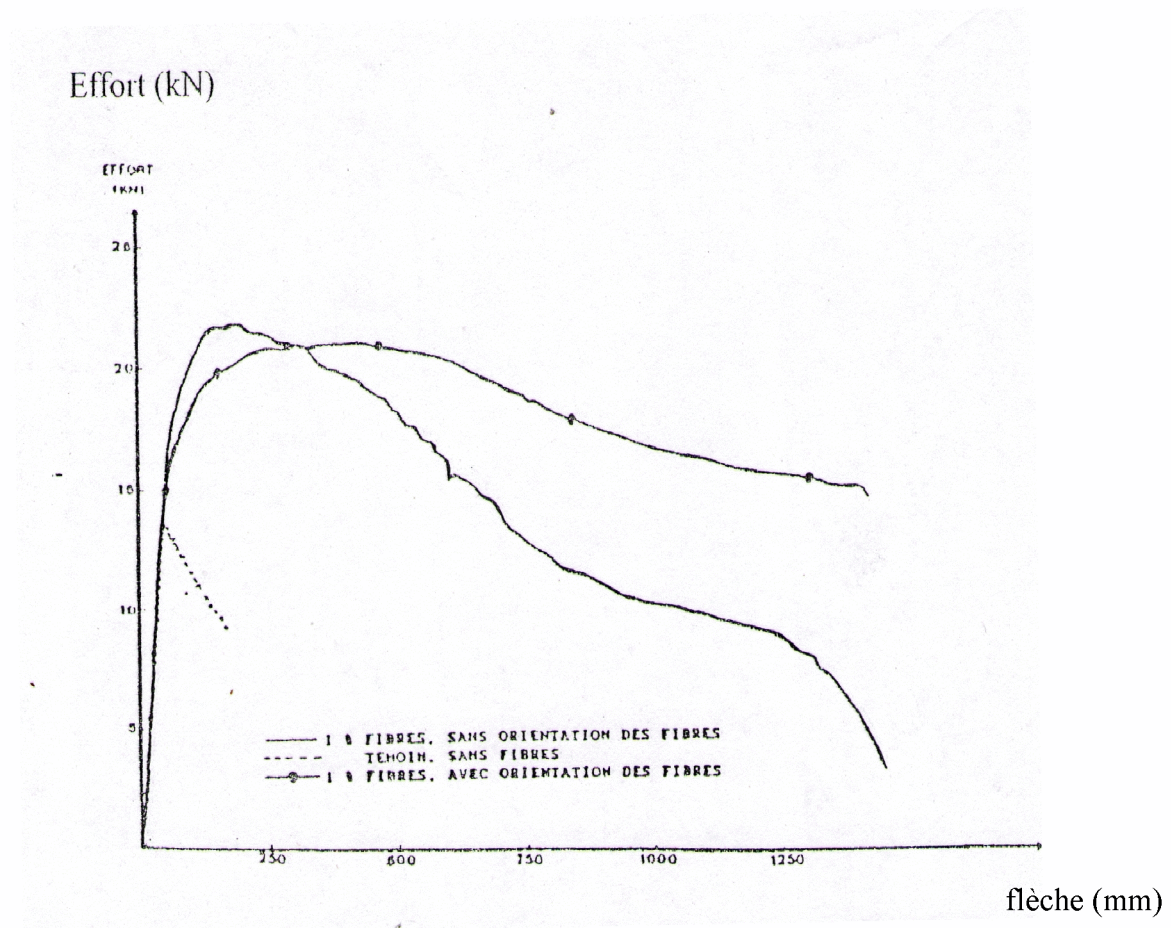


Figure I.8 Effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [14].

I.8.3 Traitement thermique du béton frais et chauffage du béton durci par effet Joule

Des études effectuées sur des dalles de dimensions variables montrent que dans le cas de traitement thermique les résultats obtenus sont analogues à ceux acquis avec les méthodes traditionnelles (Etuva) du point de vue cycle thermique et résistances, avec comme plus, une diffusion calorifique meilleure et uniforme.

De même, il est possible de chauffer un béton de fibres durci avec des tensions électriques d'autant plus faibles que le pourcentage en fibres est plus élevé. La résistivité électrique d'un béton durci pouvant être huit fois plus inférieure à celle du même béton sans fibres.

La conclusion qui se dessine est que la présence de fibres au sein d'un béton permet de lui associer, outre les avantages qu'elle lui fait éprouver (résistance à la flexion, résistance aux chocs...etc) une éventualité d'un ultérieur chauffage, ce qui donne de l'intérêt à cette qualité pour diverses utilisations telles que le diverglaçage des chaussées, des pistes d'aérodromes et manifestement pour le chauffage des bâtiments.....etc (figure I.9) [12].

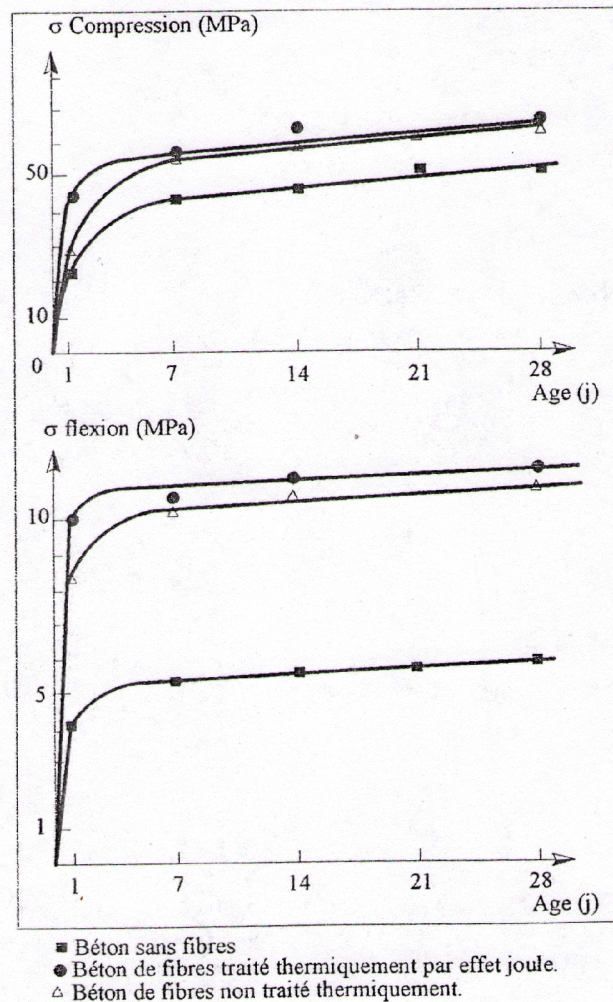


Figure I.9 Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturation [9].

I.9 Propriétés PHYSIQUES ET mécaniques des bétons armés de fibres

Afin d'éliminer toutes exagérations de dimensionnement des ouvrages en BFM ou de tout élément en faisant partie, ainsi que pour des raisons d'un fort lien entre le dimensionnement et l'application réservée pour chaque BFM, il nous est décisif d'avoir une connaissance pointue quant au comportement mécanique et thermique de ces matériaux [9].

I.9.1 Géométrie de la fibre :

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

1- En se plastifiant, l'ondulation diffuse, dans le béton, une énergie capable de multiplier par 2,5 celle de rupture en traction de la fibre [13].

2- Contrairement aux autres types de fibres, celles ondulées sont capables de s'agripper au béton. En effet, l'existence d'ondulations le long de ces fibres crée des réactions de butée et s'oppose par le fait au déchaussement de ces fibres ; ainsi la tension d'arrachement dite PULL OUT STRENGTH se retrouve comprise, en fonction de la constitution du béton considéré, entre 60 à 90 MPa [13].

Le panorama des essais de flexion entrepris sur des plaques de BFM (béton renforcé avec 20 kg/m³ de fibres EUROSTEEL) nous donne un agréable aperçu sur la meilleure répartition des fissures, ce qui montre qu'après la formation d'une fissure, à travers une ductilité plus significative, d'autres naissent dans sa proximité (figures I.10 et I.11) [13].

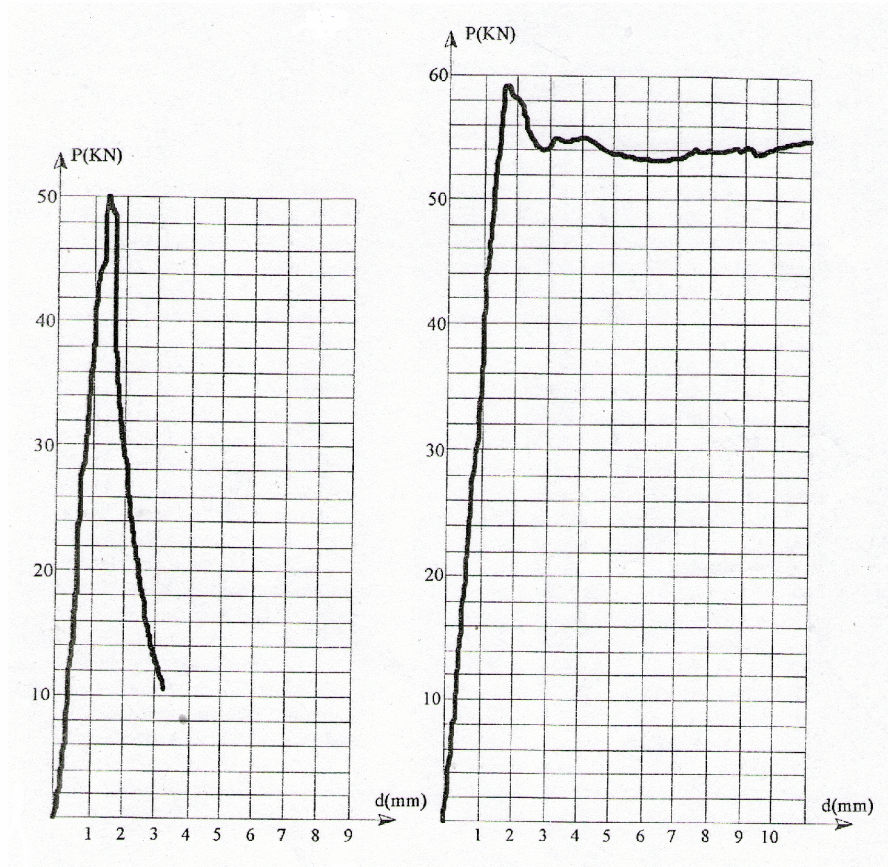


Figure I.10 Diagramme d'essai d'une dalle
Conventionnelle sans renforcement
par fibres d'acier [13].

Figure I.11 Diagramme d'essai d'une dalle de béton,
sous charge ponctuelle renforcée de 20 kg/m^3
de fibres d'acier EUROSTEEL [13].

CHANVILLARD [1], suite à des testes d'arrachement faits sur des fibres ondulées a rassemblé les constatations suivantes :

- L'accroissement de l'effort de traction suscite un éclat du béton au niveau de la fissure par suite d'un effet de bord.
- Dès lors, la fibre se trouve dégagée sur une longueur libre, toutefois le décollement se poursuit jusqu'à son arrachement total.
- La fibre, en se déformant, provoque une modification de la courbure de l'ondulation, en contre partie, une plastification de l'acier constitutif est possible, ce qui ne nous empêche pas de penser qu'une augmentation de la résistance du béton à la traction est évidente, vu le gain d'énergie apporté par le phénomène. C'est ce qui justifie la rectitude de la fibre après que l'extraction ait eue lieu et que l'on peut qualifier d'ancrage mécanique (Figure I.12et I.13).

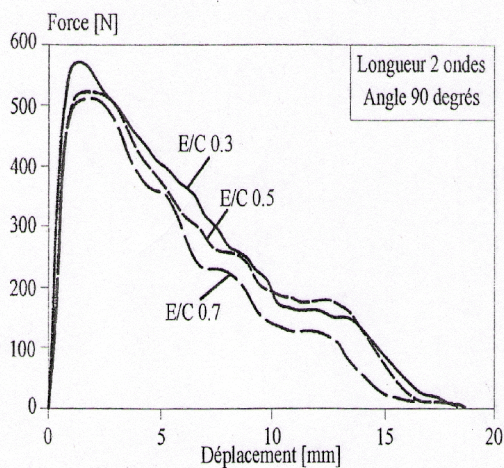


Figure I.12 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90° , 2 ondulations) [1].

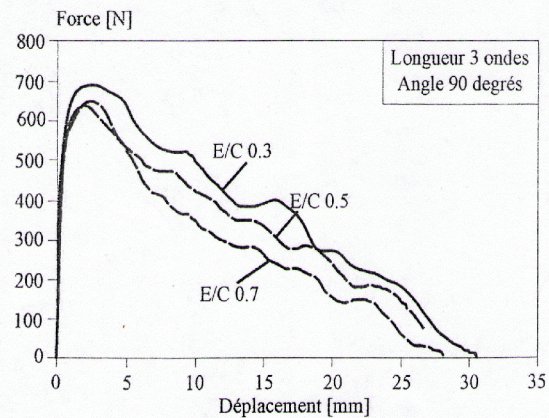


Figure I.13 Influence du rapport E/C lors d'un essai d'arrachement (orientation 90° , 3 ondulations) [1].

I.10 Comportement en flexion et A L'effort TRANCHANT « cisaillement » des bétons armés et des bétons armés de fibres

I.10.1 Introduction :

La recherche sur le comportement du béton vis-à-vis de l'effort tranchant « cisaillement » est une question d'actualité. Des efforts remarquables ont été consacrés pour la compréhension physique de ce processus de dégradation affectant les ouvrages ainsi que la capacité à décrire ce phénomène avec des modèles numériques. Plusieurs chercheurs, dans le monde du Génie-civil, ne cessent de s'impliquer dans cette vision, afin de proposer des solutions appropriées, dans le but d'assurer un bon fonctionnement de nos structures. Au fait, le contrôle de la fissuration, engendrée par cisaillement, d'un élément en béton armé entre dans le cadre de la vérification de son fonctionnement normal de l'ouvrage. Les divers règlements et recommandations ont adopté des méthodes de dimensionnement et de vérification imposant des limites de fissuration dépendant de la nature de l'ouvrage et du niveau d'exigence requis.

Cette partie présente une étude bibliographique, des essais expérimentales réalisées par des chercheurs à fin de suivre le comportement en flexion et à l'effort tranchant « cisaillement » des bétons armés de fibres.

I.10.2 Essais de l'université de São Paulo Brazil

Cette étude expérimentale a été menée à l'université de São Paulo Brazil par Sydney Furlan Jr et João Bento de Hanai [14] avec pour objectif d'étudier le comportement au cisaillement et en flexion des poutres en béton armé renforcé des fibres d'aciers et de polypropylène ainsi qu'analyser l'influence des fibres sur les performances structurelles par rapport aux différents pourcentages des armatures transversales. Les variables d'essai étaient le type et le volume des fibres. Quatorze poutres de section carrée [100x100x1000] mm³ ont été testées. Ces poutres ont été préparés à partir de sept différentes proportions du mélange (en poids) ont été maintenues constantes (ciment, sable, granulats grossiers) et un rapport Eau/ciment=0,45, un super plastifiant a été utilisé pour la bonne maniabilité du mélange. Les fibres utilisées de type polypropylène ayant une longueur L=42mm et un diamètre Ø=0,05mm, par contre les fibres en acier de section rectangulaire (0,20x2,30) mm², avec deux longueurs différentes L=25,4mm et L=38,10mm. Deux poutres ont été préparées pour chaque type de mélange, la seule variation été le pourcentage des armatures transversales (étriers), une série avec étriers (poutres série A) et une série sans étriers (poutres série B). Les caractéristiques des mélanges des poutres testées sont résumées dans le tableau I.1. Des essais de compression ont été réalisés en utilisant des cylindres de section (150x300) mm² pour déterminer les propriétés mécaniques du béton. Les poutres ont été testées en appliquant deux charges égales (essais à quatre points), la figure I.14 illustre la géométrie et le ferrailage (renforcement) des poutres testées pour les deux séries (série A et B). Les poutres ont été instrumentées avec des jauges électriques dans la zone de compression du béton (symbole C), sur les armatures transversales (symbole A). En plus des jauges de (LVDT) ont été installées sur les supports et au milieu de la poutre, à fin de mesurer les déformations (déplacements) des poutres, la figure I.15 montre la disposition et les nombres de jauges installées.

Mélange du béton	poutres	Type de fibres	Volume de fibres V _f (%)	Super plastifiant (%)
1	P1A/P1B	-	-	-
2	P2A/P2B	Polypropylène	0,5	1,0
3	P3A/P3B	Acier 25,4mm	1,0	1,0
4	P4A/P4B	Acier 25,4mm	2,0	1,0
5	P5A/P5B	Acier 25,4mm	1,0	1,0
6	P6A/P6B	Acier 25,4mm	2,0	1,0
7	P7A/P7B	Acier 25,4mm	0,5	1,0

Tableau I.1 Caractéristiques du mélange des poutres testées [14].

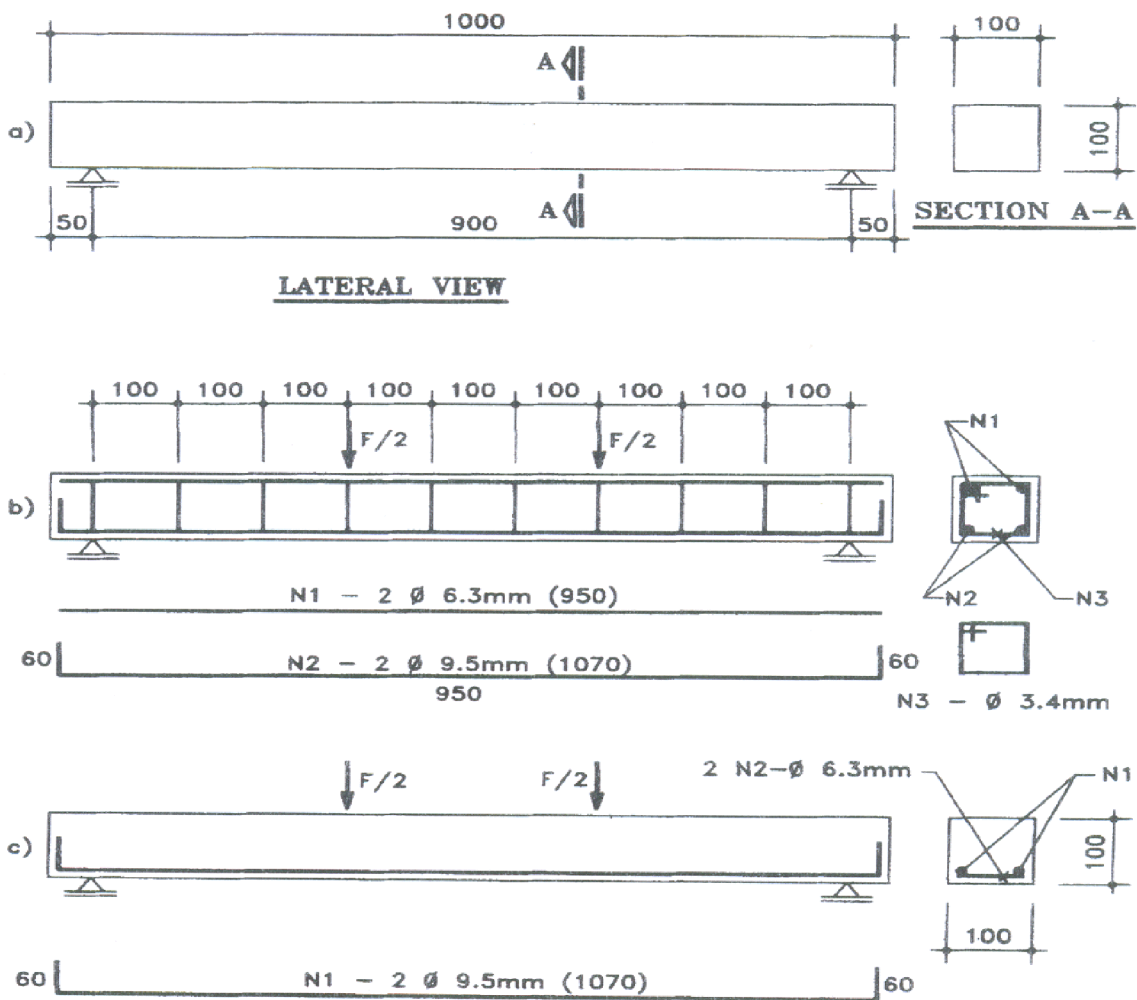


Figure I.14 (a) Géométrie, (b) Renforcement des poutres série A, (c) Renforcement des poutres série B [14].

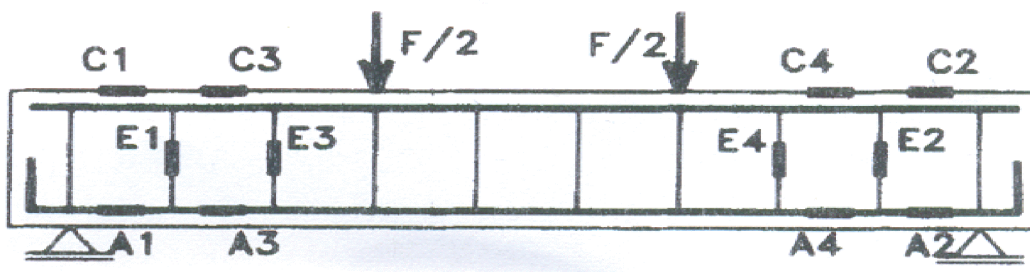


Figure I.15 Position et nombres de jauges installées [14].

Les vues des poutres (série A et B) après les testes sont présentés par les figures I.16 et I.17.



Figure I.16 Vue des poutres série A après les essais [14].

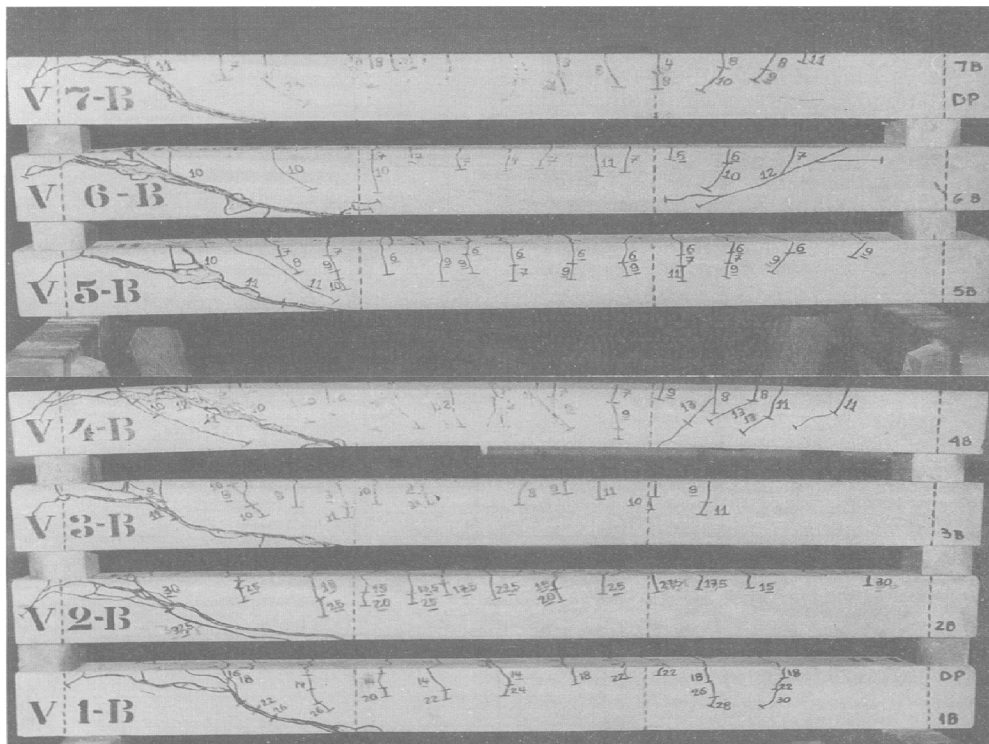


Figure I.17 Vue des poutres série B après les essais [14].

Les courbes qui présentent la force en fonction de la flèche des poutres (série A et B) testées sont présentées par les figures I.18 et I.19.

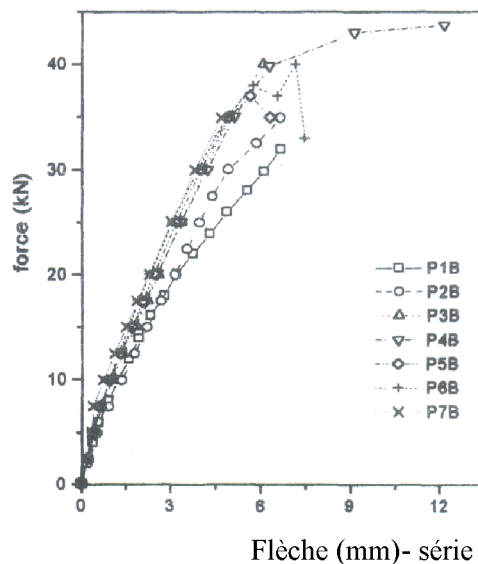
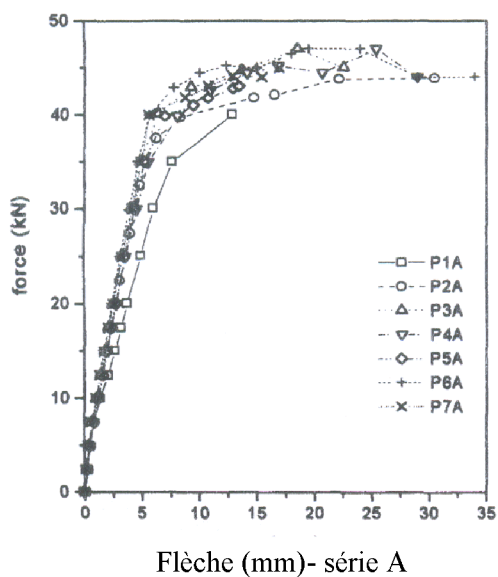


Figure I.18 Force- Flèche des poutres série A [14]. Figure I.19 Force- Flèche des poutres série B [14].

La figure I.20 montre la progression des déformations dans les étriers aux points (E3-E4) des poutres de la (série A) testées.

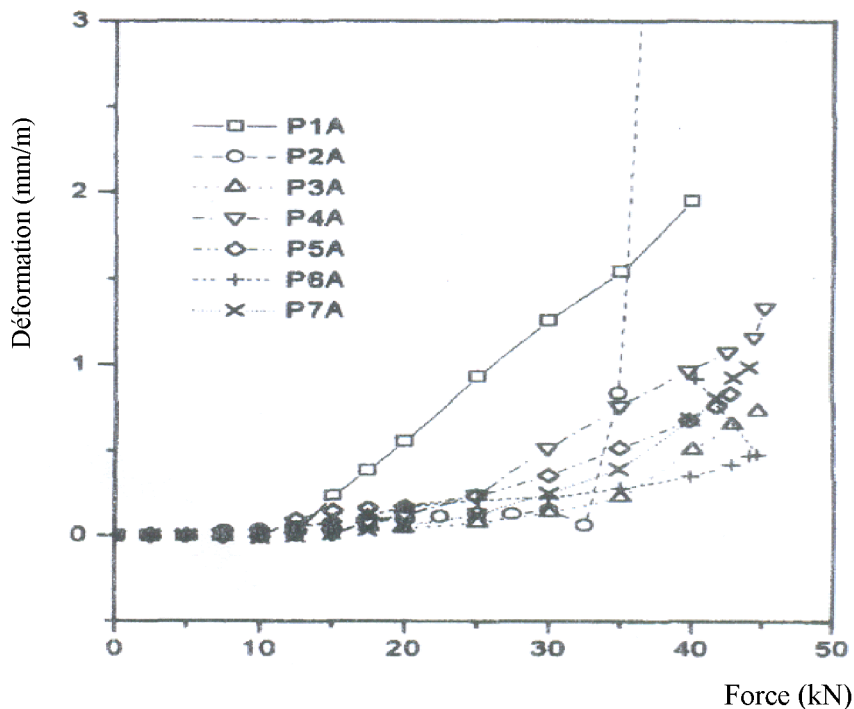


Figure I.20 Déformations dans les étriers aux points E3-E4 [14].

La figure I.21 montre la progression des déformations dans les armatures longitudinales aux points (A3-A4) des poutres (série A) testées.

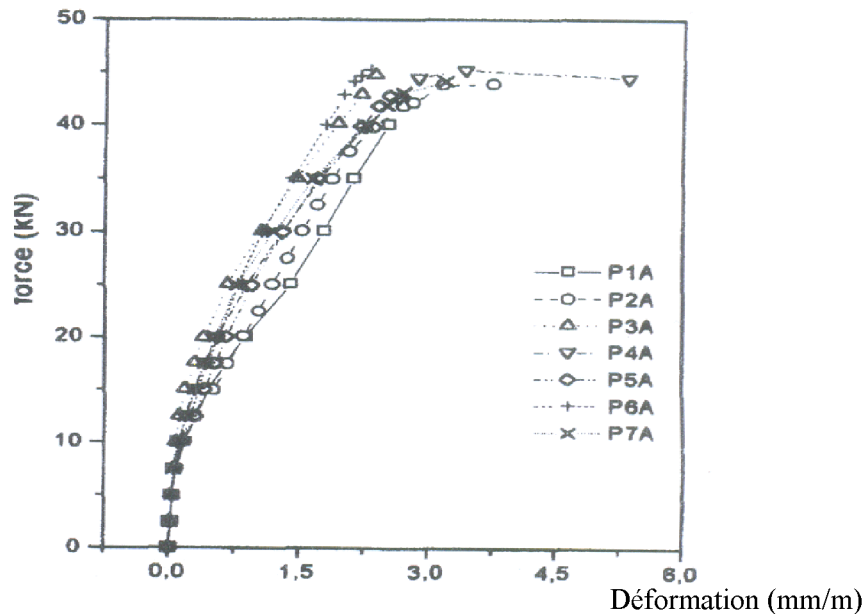


Figure I.21 Déformations dans les armatures longitudinales aux points A3-A4 [14].

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par Sydney Furlan Jr et João Bento de Hanai [14] sont :

- L'ajout des fibres diminue l'ouvrabilité du béton, en particulier dans le cas des fibres de polypropylène.
- L'ajout des fibres d'acier a donné une légère augmentation de la résistance à la traction, dans le cas des fibres longues et le module d'élasticité, en particulier dans le cas des fibres courtes.
- La propagation des fissures du béton renforcé de fibres a été relativement lente et, par conséquent les déformations (flèches) ont été réduites.
- La ductilité augmente seulement de manière significative pour les poutres sans étriers et avec plus de 2% des fibres d'acier, et pour les poutres avec 2% de fibres d'acier courtes, la même chose pour les poutres sans fibres et avec des étriers prouvant la faisabilité du remplacement des étriers par les fibres.
- L'ajout de fibres a augmenté la résistance au cisaillement, la rupture était plus ductile dans pratiquement toutes les poutres renforcées de fibres.
- Les résultats obtenus montrent qu'il y a des différences dans la façon dont les fibres d'acier et polypropylène agissent en cisaillement, et cela est dû à la différence des modules d'élasticité.

I.10.3 Essais de l'université de South Korea

Cette étude expérimentale et théorique a été menée à l'université South Korea par D.H Lim et B.H.Oh [15] avec pour objectif d'étudier :

- 1- Le comportement mécanique au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier.
- 2- La possibilité de remplacer les armatures transversales (étriers) par des fibres d'acier.
- 3- La possibilité de faire un mélange (étriers+ fibres) pour améliorer la ductilité au cisaillement et limiter les ouvertures des fissures.

Un programme d'essais portant sur trois séries de trois poutres (un total de neuf poutres) a été réalisé et testé à l'université de SOUTH KOREA par D.H. Lim et B.H.Oh [15].

Toutes les poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 100 mm, une hauteur de 180mm et une longueur $L=1300\text{mm}$ (voir figure I.33). Les variables importantes d'essai étaient les fractions volumiques des fibres en acier et le pourcentage des armatures transversales (étriers). Le pourcentage des armatures transversales (étriers) a été varié entre 0% à 100%, les fractions volumiques des fibres ont été variées de 0% à 2%, les fibres utilisées ont un diamètre $\varnothing=0,7\text{mm}$ et une longueur de $L=42\text{mm}$, les armatures longitudinales utilisées ayant un diamètre $\varnothing=16\text{ mm}$ pour les armatures tendues et un diamètre $\varnothing=10\text{ mm}$ pour les armatures comprimées, le diamètre des armatures transversales (étriers) est de $\varnothing=6\text{ mm}$, les caractéristiques des aciers et les fibres utilisées sont présentées dans le tableau I.2. Les poutres ont été testées sous applications de deux charges concentrées égales (essai à quatre points), trois comparateurs d'une précision de 0,01 mm ont été utilisés pour mesurer les déformations à plusieurs endroits. Des jauges ont été attachées sur les barres longitudinales et les étriers afin de mesurer les déplacements (figure I.22). Les charges ont été appliquées, étape par étape jusqu'à la rupture, l'incrément de charge utilisé est de 0,5 tonne.

	Limite d'élasticité [MPa]	Résistance à la traction [MPa]	Module de Young [MPa]
Barres d'acier	420	545	2×10^5
Etriers	359	534	2×10^5
Fibres d'acier	1303	1784	2×10^5

Tableau I.2 Caractéristiques des aciers et fibres utilisées [15].

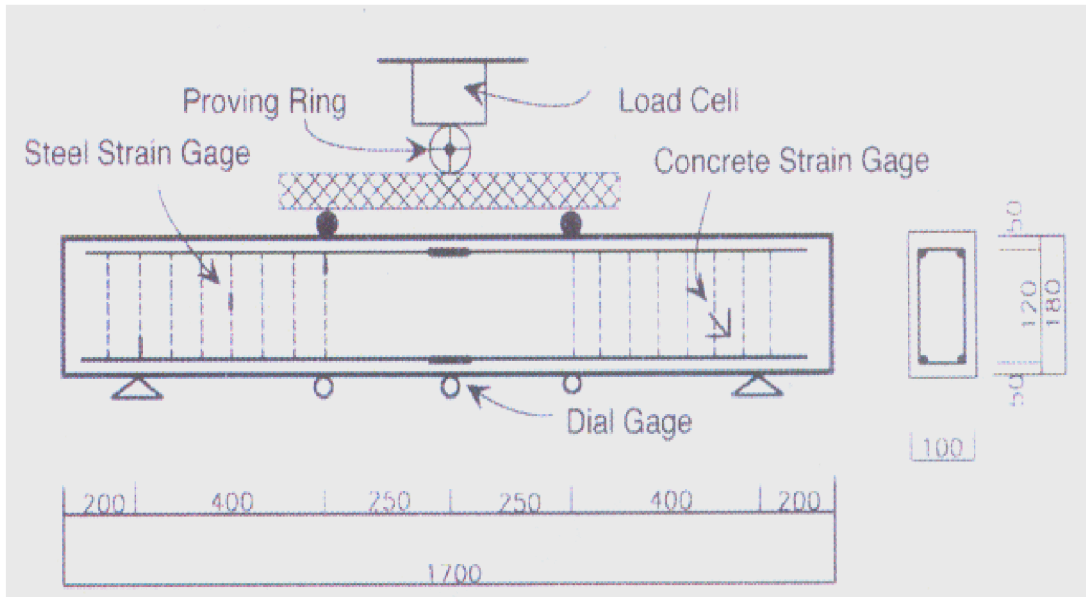


Figure I.22 Dispositif d’essai des poutres testées [15].

Les résultats obtenus à la fin des tests sont présentés sous forme de graphes comme suit :

La figure I.23 montre la comparaison des différentes résistances relative (compression, flexion, traction) en fonction des teneurs en fibres (%) pour les poutres testées.

Résistance relative

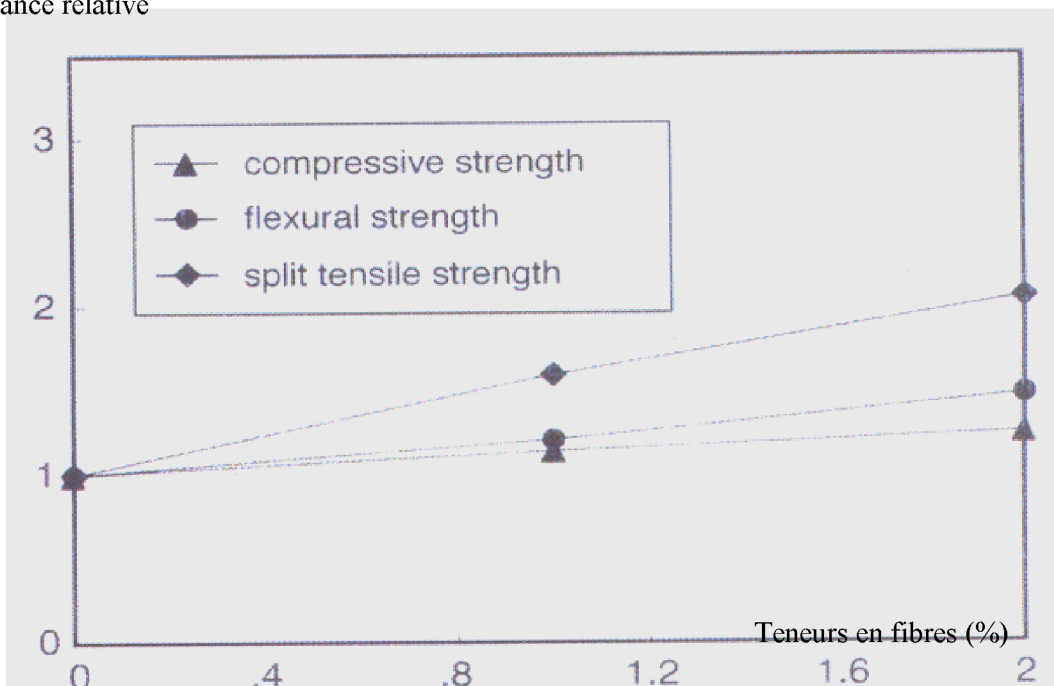


Figure I.23 Comparaison des différentes résistances relatives en fonction des teneurs en fibres [15].

La figure I.24 montre le mode de fissuration pour les différentes poutres testées.



Figure I.24 Mode de fissuration pour les différentes poutres testées [14].

Les courbes charge-flèche pour les poutres testées avec et sans armatures transversales (étriers) sont présentées par les figures I.25 et I.26.

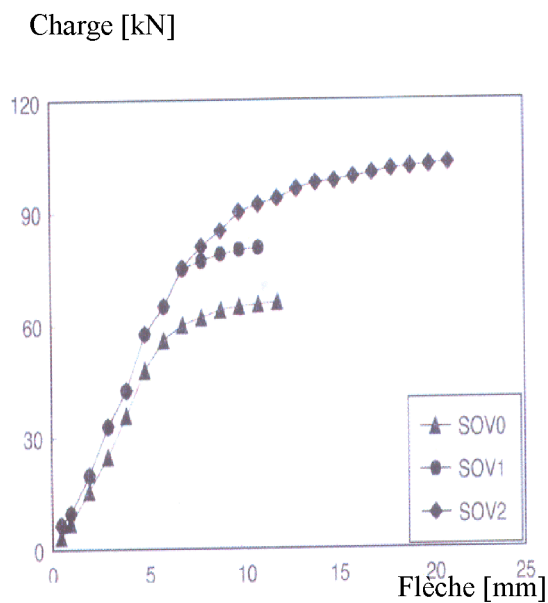


Figure I.25 Courbe charge-flèche pour les Poutres sans étriers [15].

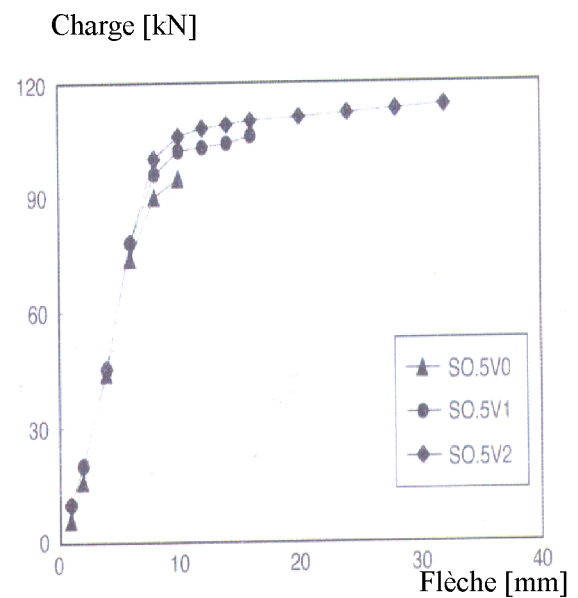


Figure I.26 Courbe charge-flèche pour les poutres avec 50% des étriers conventionnels [15].

La courbe résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%), ainsi que la courbe résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) pour les poutres testées avec et sans armatures transversales (étriers) sont présentées par les figures I.27 et I.28.

Résistance à la fissuration au cisaillement [MPa]

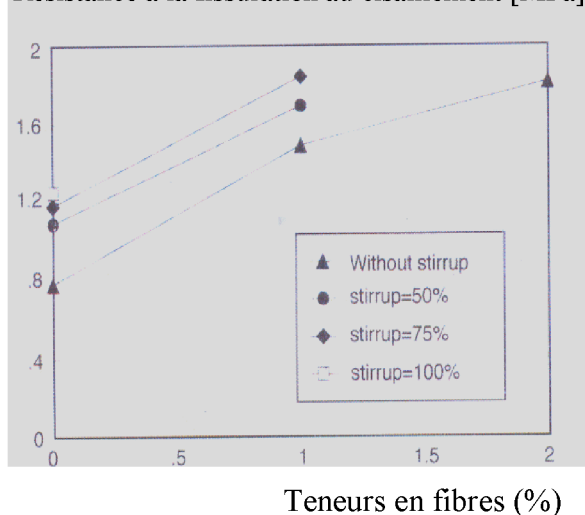


Figure I.27 Résistance à la fissuration au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].

Résistance ultime au cisaillement [MPa]

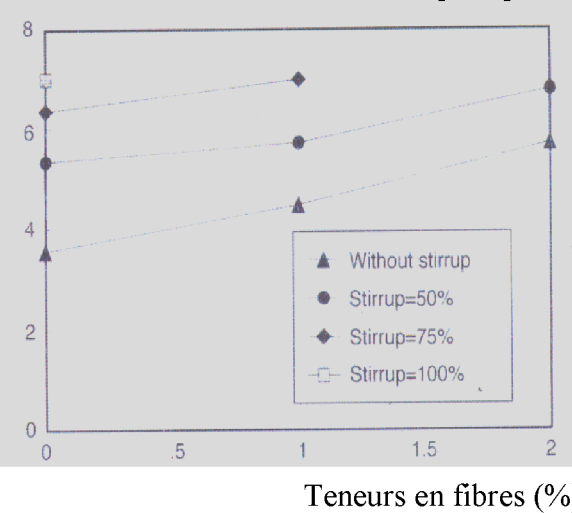


Figure I.28 Résistance ultime au cisaillement en fonction des teneurs en fibres (%) [15].

D'après cette étude expérimentale et théorique menée par LIM D.H ET OH B.H [15] sur le comportement au cisaillement des Poutres en béton armé avec fibres d'acier, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- 1- L'ajout des fibres d'acier augmente la résistance à la compression, flexion et la traction
- 2- Le mode de fissuration change au cisaillement et en flexion lorsque la fraction volumique des fibres d'aciers utilisée dépasse un certain pourcentage, soit environ de 1% dans cette étude. Cela signifie que l'ajout des fibres augmente la capacité de résistance au cisaillement considérablement.
- 3- La résistance de la fissuration au cisaillement à augmente considérablement environ deux fois, en raison de l'ajout des fibres d'acier lorsque le pourcentage en fibre utilisée est de 1%. Ainsi, l'ajout des fibres limite les ouvertures des fissures au cisaillement.
- 4- L'utilisation des teneurs en fibres peut réduire le nombre d'étriers pour résister au cisaillement et une combinaison de fibres et étriers peuvent satisfaire aux exigences de résistance et ductilité.

5- Une méthode d'analyse pour prédire la résistance au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier est présentée. La méthode permettra l'analyse du comportement au cisaillement des poutres en béton armé contenant des fibres d'acier.

I.10.4 Travaux de T.M. Roberts et N. L. H

Cette étude expérimentale a été menée par T.L. Roberts et N .L. Ho [16] avec pour objectif d'étudier la rupture par cisaillement des poutres de grande hauteur en béton armé renforcées de fibres d'acier. Trois séries de poutres ont été testées expérimentalement, ces poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 50mm et une hauteur H=200mm, un seul type de fibres à été utilisée « fibres Duoform » dans cette expérimentale, trois teneurs en fibres ont été utilisées (0%, 3% et 4,5%) , les dimensions de ces fibres utilisées on un diamètre $\varnothing=0,38\text{mm}$ et une longueur $l=38\text{mm}$. La composition du béton utilisée est constituée du (ciment, sable, granulats et eau), le ciment utilisée et de type portland, le diamètre maximale des granulats utilisées et de 10mm. Le même jour du coulage des poutres, des éprouvettes cylindriques de dimensions [150x300]mm, ont été coulées on utilisant le même béton, à fin de déterminer la résistance du béton à la compression. Après coulages les poutres et cylindres ces derniers sont stockés dans de eau pendant 28 jours à une température de 20° , le détail des spécimens des poutres testées sont données dans le Tableau I.3.

poutres	Largeur de poutre « b » (mm)	hauteur Utile « d » (mm)	Langueur (mm)	endroit de Cisaillement « a » (mm)	a/d	Teneurs en fibres en « % »
PCB1	50	170	1000	410	24	0
F3 0B1	50	170	1000	410	24	3,0
F4 5B1	50	170	1000	410	24	4,5
PCB2	50	170	725	273	16	0
F3 0B2	50	170	725	273	16	3,0
F4 5B2	50	170	725	273	16	4,5
PCB3	50	170	455	137	08	0
F3 0B3	50	170	455	137	08	3,0
F4 5B3	50	170	455	137	08	4,5

Tableau I.3 Détails des spécimens des poutres testées [16].

Toutes les poutres et cylindres ont été testées après 31 jours, les cylindres en compression par contre les poutres en flexion « essai à trois points », la charge appliqué est reparti à travers deux plaques de largeur de 50 mm, le détail de chargement des poutres testés est présenté par la figure I.29. La vitesse de chargement à été gardé constante 0,5 mm/min à fin que les fissures pourrait être détectés et visualisées.

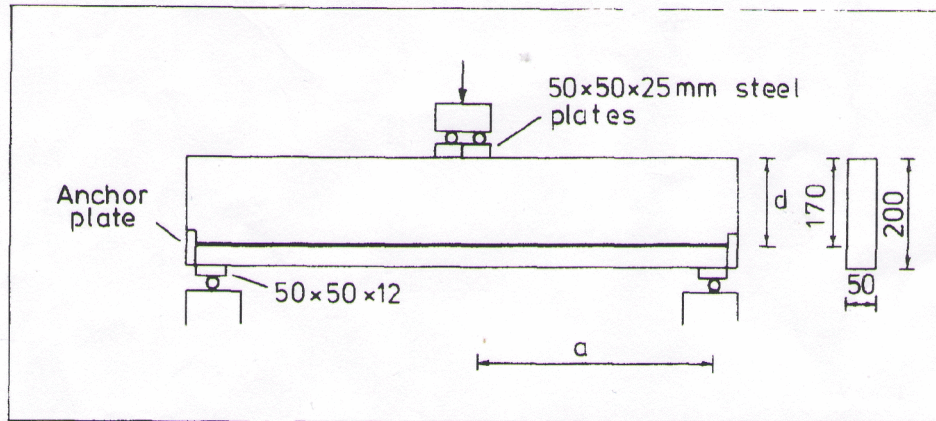


Figure I.29 Détails de chargement des poutres testées [16].

Après les testes des différentes poutres, le mode de fissuration des poutres testées pour les différents rapports (a/d) sont représentés par les figures I.30, I.31 et I.32.

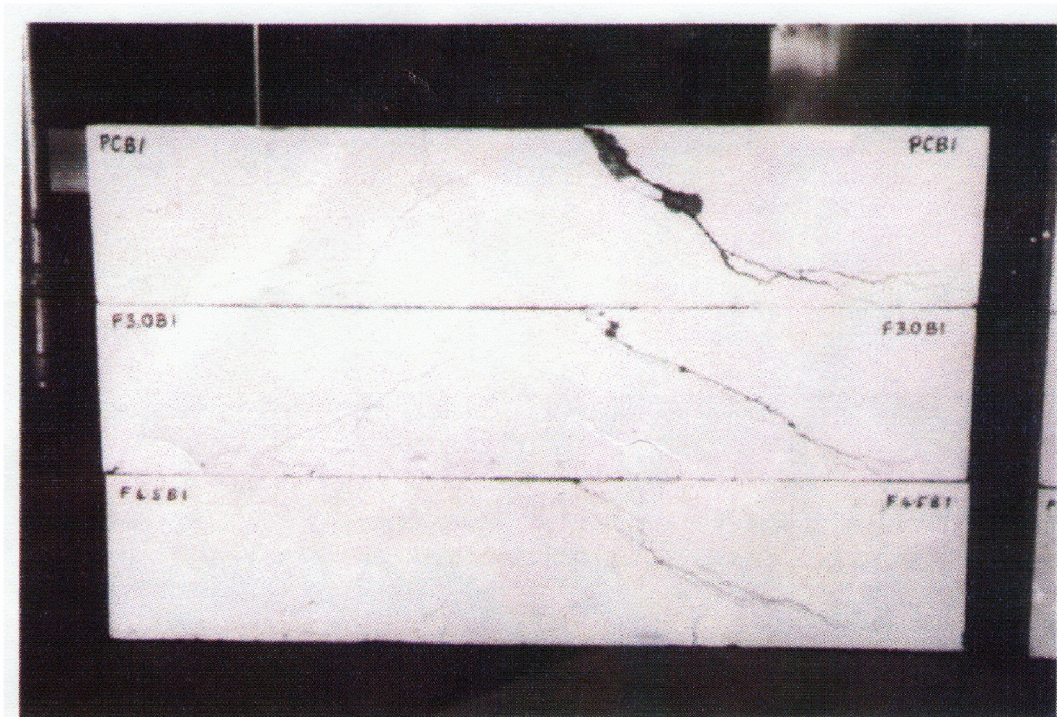


Figure I.30 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=24$ [16].

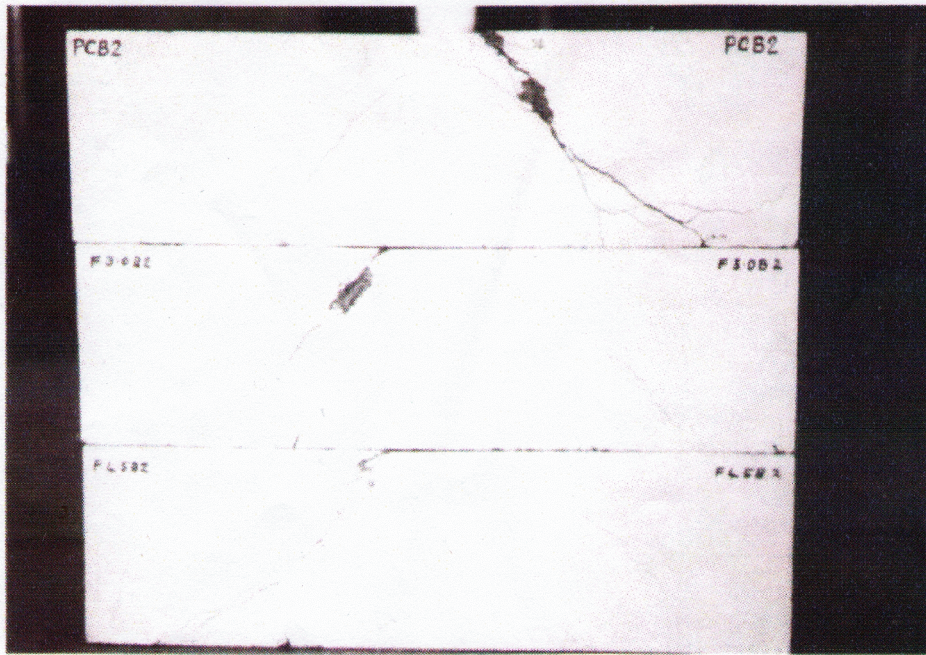


Figure I.31 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=16$ [16].

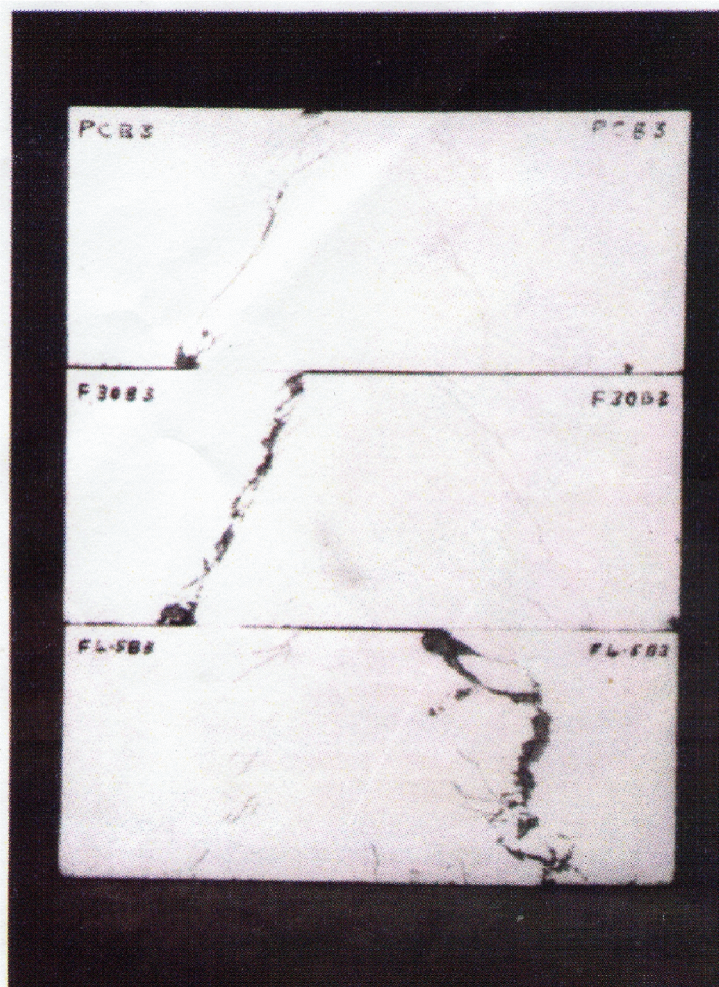


Figure I.32 Mode de fissurations des poutres testées pour $a/d=8$ [16].

La superposition des courbes de la figure I.33, présente le rapport entre le moment max théorique M_u sur le moment max à la rupture M_f (M_u/M_f) en fonction du rapport à (a/d).

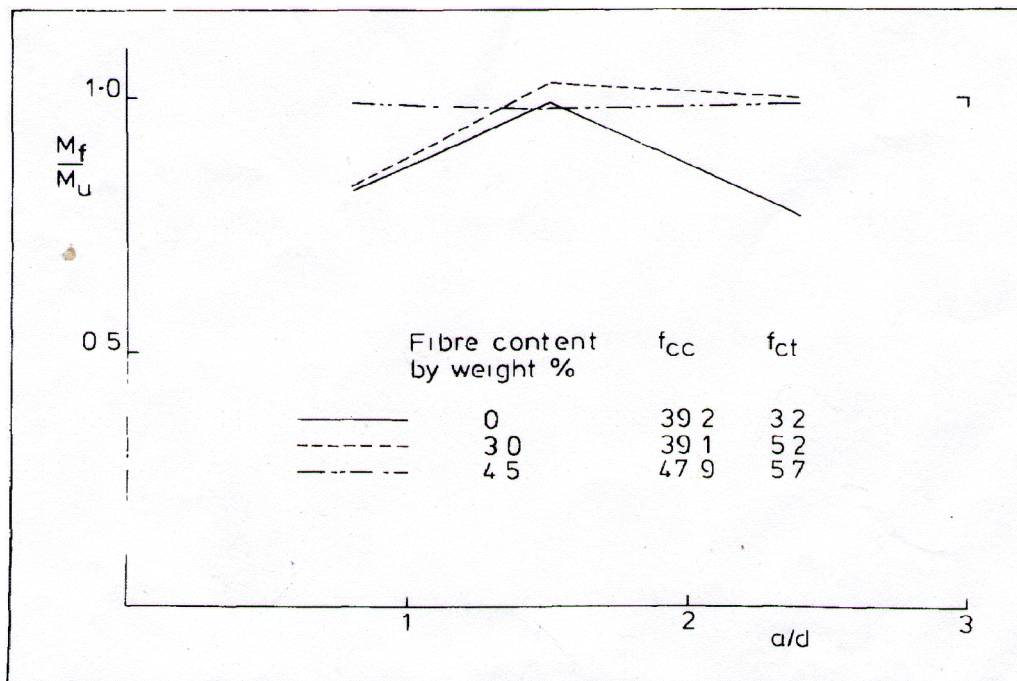


Figure I.33 Rapport du moment théorique/ moment à la rupture en fonction de rapport à a/d [16].

Avec :

M_u : Moment max théorique.

M_f : Moment max à la rupture.

f_{cc} : Résistance à la compression du béton testé.

f_{ct} : Résistance à la traction du béton testé.

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par T.L. Roberts et N.L. Ho [16] a fin d'étudié le comportement à l'effort tranchant (rupture par cisaillement) des poutres de grande hauteur en béton armé renforcées par des fibres d'acier sont :

- 1- La fissuration au cisaillement en particulier dans le cas des poutres de grandes hauteur ce produit avant la résistance ultime à la flexion.
- 2- L'inclusion des fibres d'acier dans le béton augmente la capacité ultime à la flexion et aussi la résistance à la rupture par cisaillement.
- 3- Les résultats obtenus par cette étude expérimentale pour le cas des poutres de grande

hauteur appuyé sur les conclusions de la référence [17], montrent que pour un rapport a/d important, la fissuration par cisaillement peut être évitée par l'inclusion des fibres à la place des armatures.

4- Les résultats obtenus aussi montrent que les poutres de grande hauteur résistent bien à l'effort tranchant « cisaillement » principalement par l'action arcade.

5- Les résultats obtenus aussi par cette étude appuyée sur les conclusions des hauteurs des références [18,19] que les fissures diagonales ne peuvent pas se produire jusqu'à ce qu'il soit précipité par d'autres procédés tels que le relâchement des armatures à la traction ou fissures à la compression du béton sous la charge appliquée.

I.10.5 Essais de l'université North Carolina state Etats-Unis (USA)

Cette étude expérimentale a été menée à l'université de l'état CAROLINE du nord, Etats-Unis (USA) [20] avec pour objectif d'étudier la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger à résistance normale (ordinaire) et à haute résistance, (15) poutres en béton armé ordinaire et de haute résistance avec et sans armatures transversales ont été testées expérimentalement. Toutes les poutres testées ont les dimensions suivantes : une largeur de 127 mm, une hauteur de 254mm (figure I.34). Les variables d'essai étaient la résistance du béton à la compression (f_c), le rapport entre le point d'application de l'effort et la hauteur utile (a/d) qui varie de 1 à 4, ainsi que la quantité des armatures transversales (étriers). La résistance à la compression du béton varie entre 30,5MPa et 89,3MPa. Le pourcentage des armatures transversales a été varié entre 0 et 0,784% (tableau I.4). La composition du béton léger (normale) et de haute résistance est constituée du ciment portland type1, de sable ayant un module de finesse de 2,62, le diamètre maximale des granulats utilisées est $\varnothing=12,5$ mm et d'eau. Pour assurer une bonne maniabilité du béton un adjuvant (super plastifiant) a été utilisée. Les armatures longitudinales et transversales utilisées ayant un diamètre $\varnothing =8$ mm, la limite d'élasticité moyenne obtenue sur trois essais, et de l'ordre de 421MPa pour les armatures longitudinales et de 324MPa pour les armatures transversales (étriers).

Des cylindres de « contrôle » ont été testés périodiquement à fin de vérifier si le béton atteint la contrainte de compression désirée. Le jour des essais sur les poutres, trois (03) cylindres de « contrôle » ont été testés en compression pour déterminer la résistance du béton.

Le dispositif d'essai utilisées pour le teste des poutres et les cylindres est montré par la figure I.35, des éléments raidisseurs ont été ajoutés à une installation d'essai existants, c'est des supports

rigides avec une poutre d'acier croisée rigides ont été utilisées pour agir comme élément raidisseur et d'absorption d'énergie dans le dispositif d'essais, ainsi que des vérins hydraulique ultra- haute résistance ont été utilisées pour initier le contact des supports rigides avec la poutre en acier croisée. Un capteur (LVDT) et des jauges ont été montés afin de mesurer les déplacements (déformations) verticales à mi-portée des poutres et les déformations dans les armatures transversales (étriers).

N° de la poutre	Largeur de poutre (mm)	hauteur Utile (mm)	a/d	Age de Test (jours)	Contrainte du béton testé (MPa)	Armatures tendues A_s (mm ²)	Armatures Comprimées A'_s (mm ²)	Espacement des étriers (mm)	Armatures transversales (%)
LNN-1	127	216	1	143	33,79	258	0	/	0
LNN-2	127	216	2	136	44,83	258	0	/	0
LNN-3	127	216	3	150	40,34	258	0	/	0
LNW-1	127	216	1	151	30,55	567	258	101	0,49
LNW-2	127	216	2	133	38,97	567	258	101	0,49
LNW-3	127	216	3	142	44,62	567	258	101	0,49
LHN-1	127	216	1	107	86,90	567	0	/	0
LHN-2	127	216	2	76	85,45	567	0	/	0
LHN-3	127	216	3	103	89,17	567	0	/	0
LHW-1	127	198	1	85	82,34	1135	258	99	0,51
LHW-2	127	198	2	82	85,79	1135	258	99	0,51
LHW-3	127	198	3	76	89,31	1135	258	99	0,51
LHW-3a	127	198	3	85	88,21	1135	258	76	0,65
LHW-3b	127	198	3	72	86,97	1135	258	63	0,78
LHW-4	127	198	4	66	82,97	1135	258	99	0,51

Tableau I.4 Caractéristiques des poutres testées [20].

Avec :

LNN-1

L : Béton léger.

N : Résistance normale (ordinaire).

N : Poutres sans armatures transversales (sans étriers).

1 : Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d)

LHW-2

L : Béton léger

H : Haute résistance.

W : Poutres avec armatures transversales (avec étriers).

2 : Effet de l'effort tranchant en fonction du rapport (a/d).

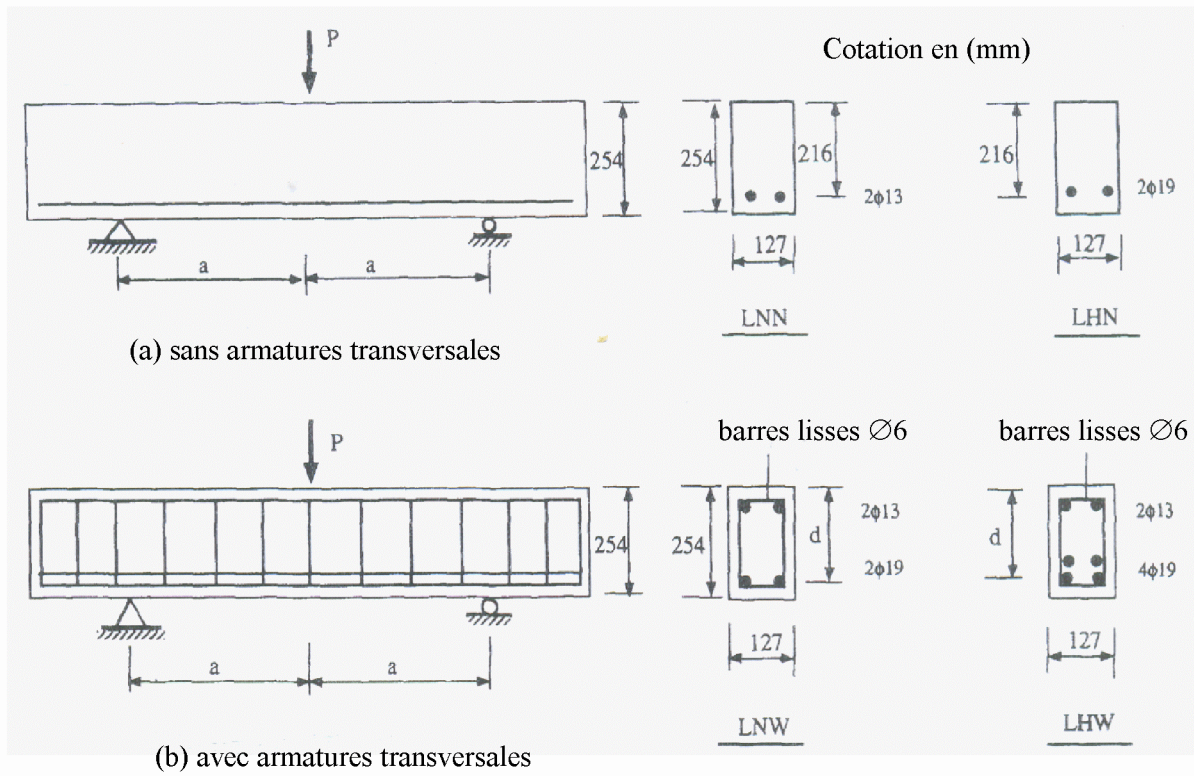


Figure I.34 Description des poutres testées en béton normale et à haute résistance [20].

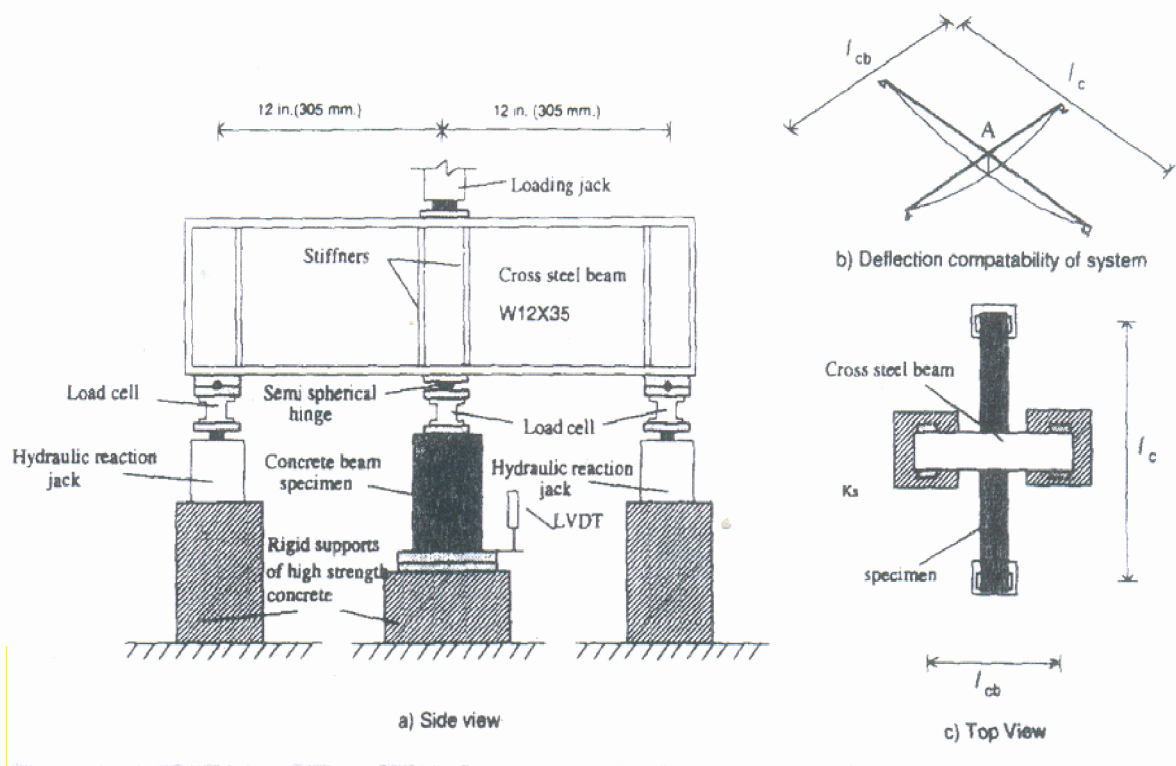


Figure I.35 Dispositif d'essais utilisée [20].

Les résultats présentés dans le Tableau I.5, comprennent les valeurs observées des charges (ultime) et le type de rupture des poutres testées en béton armé normale et à haute résistance.

N ^o de la poutre	a/d	f_c (MPa)	Charge Ultime P_u (kN)	Type de rupture
LNN-1	1	33,79	211,72	Compression- diagonale
LNN-2	2	44,83	66,75	Cisaillement- compression
LNN-3	3	40,34	45,30	Traction- diagonale
LNW-1	1	30,55	299,83	Compression- diagonale
LNW-2	2	38,97	168,38	Cisaillement- compression
LNW-3	3	44,62	126,60	Cisaillement- compression
LHN-1	1	86,90	377,17	Compression- diagonale
LHN-2	2	85,45	170,87	Cisaillement- compression
LHN-3	3	89,17	86,82	Traction- diagonale
LHW-1	1	82,34	554,95	Compression- diagonale
LHW-2	2	85,79	270,95	Cisaillement- compression
LHW-3	3	89,31	184,93	Cisaillement- compression
LHW-3a	3	88,21	214,13	Cisaillement- compression
LHW-3b	3	86,97	241,45	Cisaillement- compression
LHW-4	4	82,97	189,70	Cisaillement- compression

Tableau I.5 Charges (ultime) et type de rupture des poutres testées [20].

Les courbes qui présentent la charge en fonction de la flèche à mi-portée pour les 15 poutres testées en béton armé léger normale et à haute résistance, pour les différents rapports (a/d) et pour les différents pourcentages des armatures transversales (étriers) ainsi que pour l'effet de la résistance du béton à la compression sont présentées dans les Figures I.36, I.37, I.38.

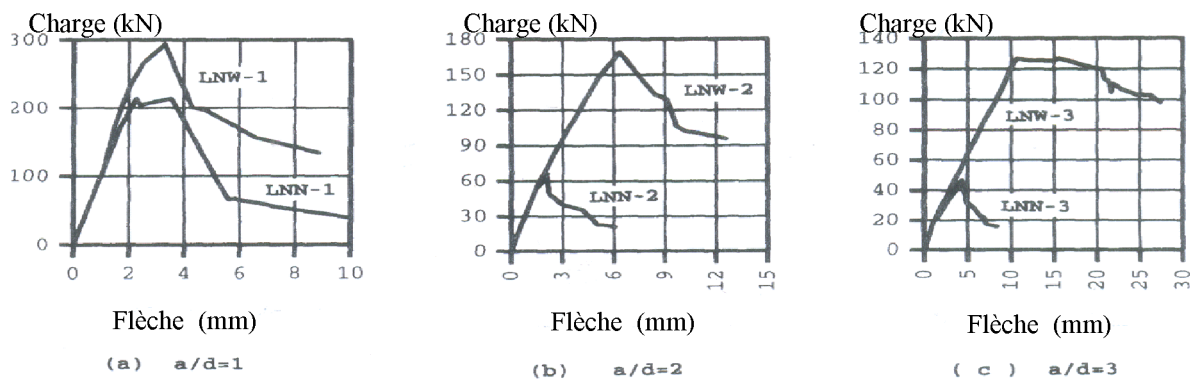


Figure I.36 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé léger avec armatures transversales [20].

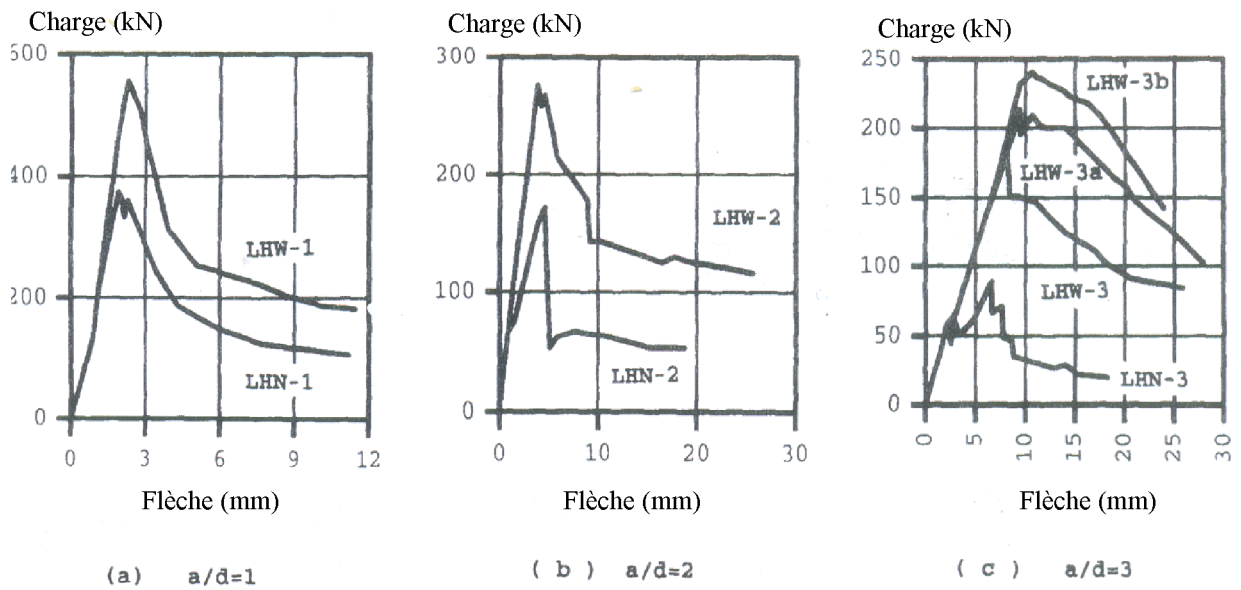


Figure I.37 Courbes Charge- Flèche à mi-travée pour un béton armé à haute résistance avec armatures transversales [20].

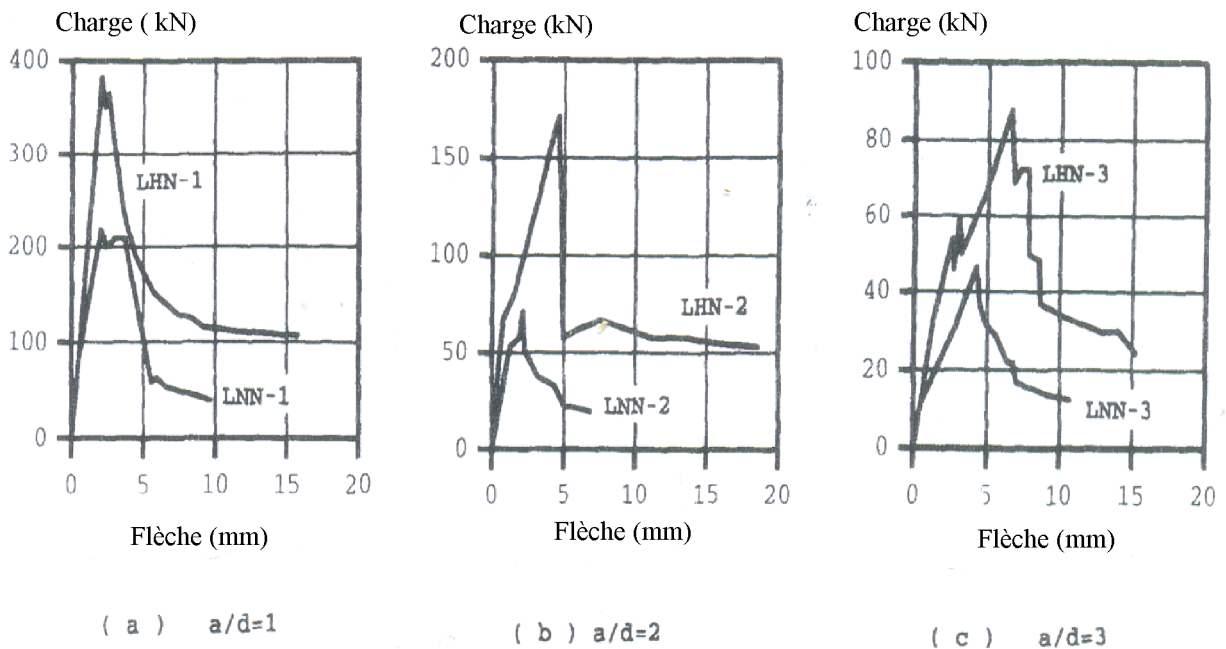


Figure I.38 Effet de la résistance du béton sur la flèche à mi-travée pour un béton léger sans armatures transversales [20].

Les courbes qui présentent l'effet du rapport (a/d) sur le comportement charge- flèche à mi-travée du béton armé léger et à haute résistance, avec et sans armatures transversales sont présentés sur les figures I.39 et I.40.

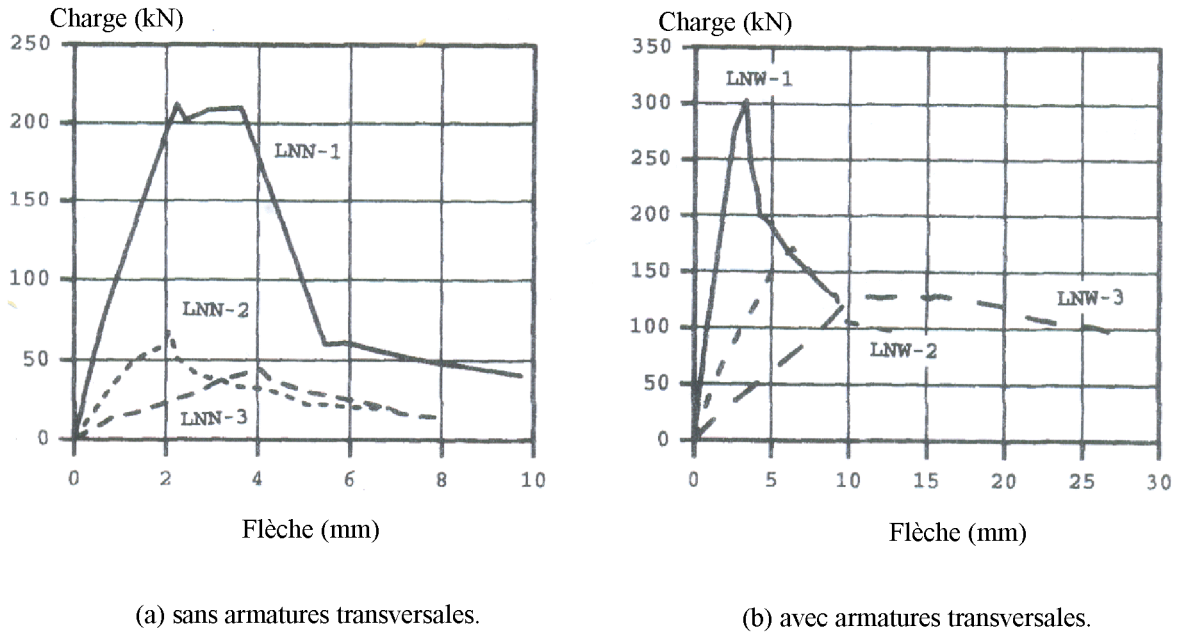


Figure I.39 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger [20].

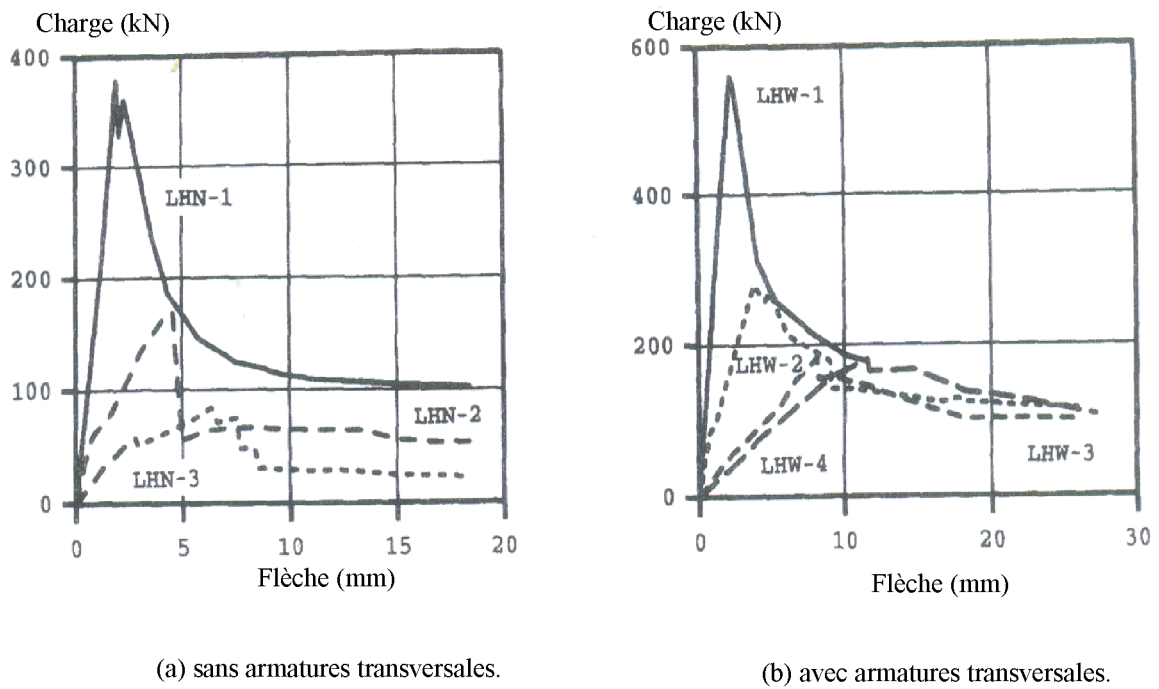


Figure I.40 Effet du rapport (a/d) sur la Charge- flèche pour un béton léger à haute résistance [20].

La courbe de la figure I.41 montre l'influence de la résistance à la compression du béton léger **sur la** ductilité au cisaillement des poutres avec et sans armatures transversales.

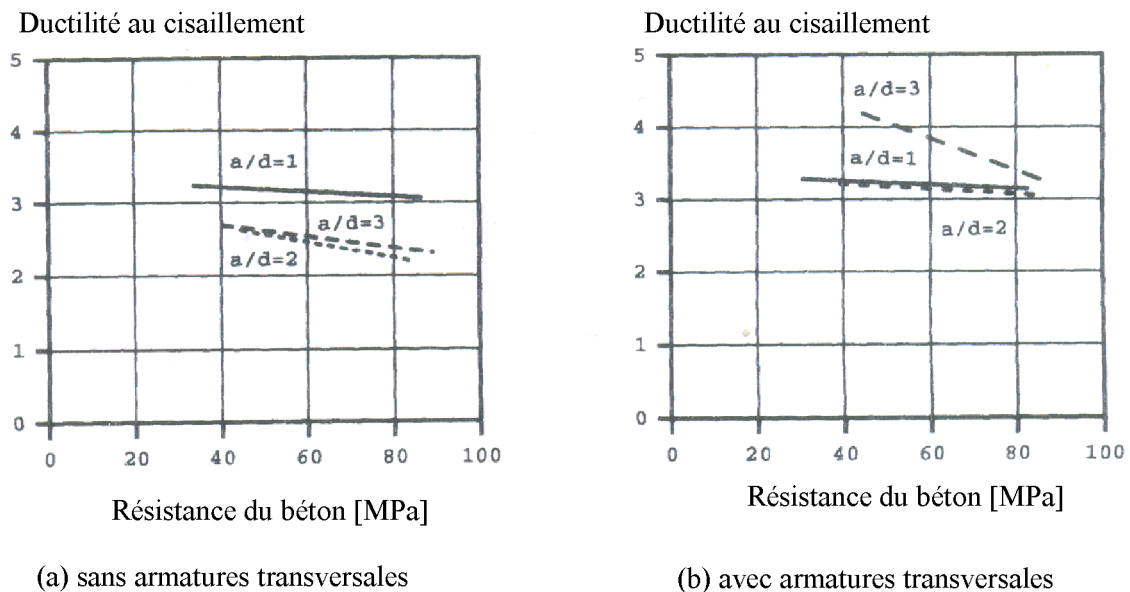


Figure I.41 Effet de la résistance du béton en compression sur la ductilité au cisaillement des poutres en béton armé léger [20].

Les conclusions tirées de cette étude expérimentale menée par S.H. Ahmed, Y. Xie & T. Yu [20] sont :

- 1- Pour les poutres avec ou sans armatures transversales (étriers), la ductilité au cisaillement décroît avec l'augmentation de la résistance du béton à la compression. Donc le cas qui donne une meilleure ductilité au cisaillement sont les poutres avec $a/d=3$ par rapport aux poutres avec $a/d=1$ ou 2.
- 2- L'augmentation du pourcentage des armatures transversales jusqu'à 0,51% a un effet négatif sur l'indice de ductilité au cisaillement pour un rapport $a/d=1$ par rapport aux poutres avec $a/d=2$ et 3, par contre l'augmentation des armatures transversales (étriers) de 0,51% à 0,65% pour les poutres avec un rapport $a/d=3$ l'indice de ductilité augmente de 25%.
- 3- Les caractéristiques de l'indice de ductilité au cisaillement, (post-pic) après le pic de déformations montre que les poutres avec $a/d=2$ présentent des valeurs inférieures par rapport aux poutres avec $a/d=1$ et 3.
- 4- Les poutres en béton armé avec un rapport $a/d=3$ présentent après le pic de déformations une phase plastique, lorsque le pourcentage des armatures transversales fournie était 5 fois plus élevé que le pourcentage minimale exigé par la section 11.1.2.1 du code ACI 318-89.