

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL



THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : GENIE CIVIL

Présentée par :

HASSANI KARIM

Sujet :

**Etude Expérimentale du comportement des dalles en
béton renforcé par des fibres métalliques et des grilles
en polypropylène**

Devant le jury composé de:

Mme. TAOUCHE- KHELOUI	Fatma	Professeur	UMMTO	Présidente
Mr. ATLAOUI	Djamal	M.C.A	UMMTO	Rapporteur
Mr. KADRI	Mohammed	Professeur	U.BOUMERDES	Examineur
Mr. HAMADOUCHE	Mohand Améziane	Professeur	U.BOUMERDES	Examineur
Mr. CHELOUAH	Nasser	Professeur	U.BEDJAIA	Examineur
Mr. GHOUILEM	Kamel	M.C.A	UMMTO	Examineur
Mr. BOUAFIA	Youcef	Professeur	UMMTO	Invité

Soutenu le 14/12/2024

REMERCIEMENTS/ DEDICACES

En premier lieu, je voudrais témoigner ma reconnaissance et sincères remerciements à mon directeur de thèse Mr Dj ATLAOUI Maitre de conférence classe A à l'université MOULOUD MAMMARI de TIZI OUZOU, pour avoir accepté de me proposer ce thème et diriger cette thèse, pour son suivi régulier, sa grande disponibilité, ses enrichissants et précieux conseils incessants grâce auxquels ce travail est mené à terme, Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour sa compréhension et ses encouragements pendant les périodes difficiles durant la réalisation de ce travail.

Je remercie Mme TAOUCHE- KHELOUI Fatma, Professeur à l'université Mouloud MAMMARI de TIZI OUZOU de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres du jury, Mr KADRI Mohammed, Professeur à l'université BOUMERDES, Mr HAMADOUCHE Mohand Améziane, Professeur à l'université BOUMERDES, Mr CHELOUAH Nasser, Professeur à l'université BEDJAIA et Mr GHOUILEM Kamel, Maitre de conférences classe A à l'université Mouloud MAMMARI de TIZI OUZOU, qui m'ont fait l'honneur d'examiner cette thèse.

Je tiens à remercier le Directeur Rabah SAIDANI, Directeur la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI), d'avoir facilité la tâche pour la récupération des déchets d'usinage « copeaux », afin de réaliser cette étude expérimentale.

Je tiens à remercier Mr R. BOUHERAOUA, les deux techniciens du Laboratoire expérimental de Génie-Civil, d'avoir m'aider durant la réalisation de cette étude expérimentale.

Que tous les enseignants et « non –enseignants » qui m'ont encouragé dans cette entreprise, je cite ; Mm A. KAHIL, M. SAAD, Y. BOUAFIA, trouvent ici l'expression de mes remerciements les plus chaleureux.

Un spécial remerciement et profonde gratitude sont adressés à ma femme, pour son soutien inconditionnel sur tous les plans, durant la période de réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi aux amis et aux collègues de la Direction des équipements publics de la Wilaya de TIZI OUZOU (DEP/SEP), aux membres et adhérents de deux Associations (Culturelle ASSIREM IGHIL MAL et Ecole Football Club IGHIL MAL), pour leur soutien moral.

Enfin, je rends un grand hommage à ma famille et belle famille, en particulier ma chère maman à laquelle je dois ce que je suis, qui m'a toujours soutenu et encouragé dans mes choix tant professionnels que privés, mes très chers enfants Aylan et Nelya, ainsi que mes frères et sœurs.

Cet humble travail est dédié à la mémoire de mon cher Père « Ahmed HASSANI » et ma chère Sœur « Karima HASSANI », que le Dieu les accueille en vaste paradis.

RESUME

L'objectif de cette étude est d'évaluer expérimentalement les propriétés mécaniques de dalles de béton renforcées avec deux types de fibres : les fibres métalliques (FM) et les grilles à base de fibres de polypropylène (FPP). Les fibres métalliques sont issues de déchets d'usinage de pièces en acier, récupérées à la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI). Elles sont dispersées aléatoirement dans le béton, tandis que les fibres de polypropylène sont organisées en grille, avec des mailles de petite et grande taille. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes de dimensions $[25 \times 50 \times 7]$ cm³ avec différents pourcentages de fibres ($W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$, et $W=1\%$), ainsi qu'un béton témoin (BT) sans fibres ($W=0\%$), élaboré comme référence. La composition du béton est déterminée selon la méthode expérimentale dite « Dreux-Gorisse ». L'objectif principal de cette étude est de suivre le comportement des dalles de béton renforcées avec des fibres métalliques dans des copeaux (FM) et des fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) en flexion, au poinçonnement centré et excentré. Les résultats montrent que les fibres métalliques (MF) améliorent plus efficacement la résistance et la rigidité que les fibres de polypropylène à mailles petites (PPG/SM) et grandes (PPG/LM), limitant ainsi la formation de fissures de perforation.

La seconde partie de cette étude vise à examiner le comportement du béton renforcé avec des fibres métalliques (BFM) et des fibres de polypropylène (BFPP) soumis à des températures élevées, ainsi que l'effet des variations de température sur leurs propriétés mécaniques. Cette analyse comprend l'évaluation de la perte de masse résiduelle ainsi que la résistance résiduelle à la compression et à la flexion. Deux teneurs en fibres optimales ont été sélectionnées pour cette étude : $W = 0,2\%$ en compression et $W = 0,8\%$ en flexion, tandis qu'un béton témoin ($W=0\%$) de la même composition sert de référence. Les essais de compression sont réalisés sur des cylindres d'un diamètre de $\varnothing 16$ cm et d'une hauteur de H32 cm, tandis que des essais de flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatiques avec des dimensions $[10 \times 10 \times 40]$ cm³. Les bétons fibrés sont soumis à différents cycles de chauffage-refroidissement, atteignant des températures maximales de 600°C et 800°C à l'âge de 28 jours. Cette étude révèle que la résistance résiduelle à la compression et à la flexion des bétons fibrés exposés à des températures très élevées de 600°C et 800°C diminue par rapport aux bétons non exposés à de telles températures (20°C). Pour toutes les températures étudiées, le béton renforcé avec des fibres métalliques (BFM) a montré une résistance significativement plus élevée que le béton

renforcé avec des fibres de polypropylène (BFPP). À 800°C, les bétons avec fibres métalliques et les bétons avec fibres de polypropylène ont tous deux présenté des réseaux de microfissures, mais l'éclatement n'est pas observé.

Mots clés : fibres de récupération/ flexion//hautes températures/ poinçonnement/mode de rupture / résistance/expérimentation/dalles en béton

ABSTRACT

The aim of this study is to experimentally evaluate the mechanical properties of concrete slabs reinforced with two types of fibers: metallic fibers (MF) and polypropylene fiber grids (PPG). The metallic fibers are derived from machining waste of steel parts, collected from the National Company of Industrial Vehicles in Algeria (SNVI). They are randomly dispersed in the concrete, whereas the polypropylene fibers are organized in grids, with small and large mesh sizes. Tests were conducted on specimens of dimensions [25x50x7] cm³ with various fiber percentages (W=0,2%, W=0,4%, W=0,6%, W=0,8%, and W=1%), as well as a control concrete (CC) without fibers (W=0%), formulated as a reference. The concrete composition is determined using the experimental method known as "Dreux-Gorisse." The main objective of this study is to monitor the behavior of concrete slabs reinforced with metallic fibers in chips (MF) and polypropylene fibers in small mesh grids (PPG/SM) and large mesh grids (PPG/LM) under bending, centered and eccentric punching. The results show that metallic fibers (MF) more effectively enhance strength and stiffness than small mesh polypropylene fibers (PPG/SM) and large mesh polypropylene fibers (PPG/LM), thus limiting the formation of punching cracks.

The second part of this study aims to examine the behavior of concrete reinforced with metallic fibers (BFM) and polypropylene fibers (BFPP) subjected to high temperatures, as well as the effect of temperature variations on their mechanical properties. This analysis includes the evaluation of residual mass loss as well as residual strength in compression and bending. Two optimal fiber contents were selected for this study: W = 0,2% in compression and W = 0,8% in bending, while a control concrete (W=0%) of the same composition serves as a reference. Compression tests are performed on cylinders with a diameter of Ø16 cm and a height of H32 cm, while bending tests are conducted on prismatic specimens with dimensions [10x10x40]cm³. The fiber-reinforced concretes are subjected to different heating-cooling cycles, reaching maximum temperatures of 600°C and 800°C at 28 days of age. This study reveals that the residual strength in compression and bending of fiber-reinforced concretes exposed to very high temperatures of 600°C and 800°C decreases compared to concretes not exposed to such temperatures (20°C). For all temperatures studied, concrete reinforced with metallic fibers (BFM) showed significantly higher strength than concrete reinforced with polypropylene fibers (BFPP). At 800°C, both concrete with metallic fibers and concrete with polypropylene fibers exhibited networks of microcracks, but no spalling was observed.

Keywords: recovery fibers / bending / high temperatures / punching / failure mode / strength / experimentation / concrete slabs.

TABLE DES MATIERES

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale.....2

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction.....7

I.2. Composition du béton7

I.3. Matériaux composites7

 I.3.1. La Constitution des matériaux composites.....7

 I.3.1.1. La matrice.....8

 I.3.1.2. Renforts.....8

 I.3.2. Les fibres métalliques.....8

 I.3.3. Les fibres Polypropylènes.....9

I.4. Spécificité du comportement des bétons avec des fibres.....10

I.5. Principe d'action des fibres.....11

I.6. Rôle des fibres dans le béton.....13

I.7. Influence des fibres noyées dans le béton.....14

 I.7.1. Influence de pourcentage des fibres.....14

 I.7.2. Influence de l'orientation des fibres.....15

 I.7.3. Distribution des fibres.....16

 I.7.4. Influence de l'adhérence fibre matrice de béton.....16

I.7.5. Mécanisme de rupture d'une fibre dans la matrice.....	17
I.7.6. Traitement thermique du béton frais et chauffage du béton durci par effet Joule.....	18
I.7.7. Conclusion.....	19
I.8. Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis a une température élevée.....	19
I.8.1. Sur l'instabilité thermique.....	20
I.8.2. Sur la perte de masse du béton.....	20
I.8.3. Résistance en compression.....	21
I.8.4. Résistance en traction par flexion.....	22
I.9. Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis a une température élevée.....	22
I.9.1. Perte de masse.....	23
I.9.2. Résistance en compression.....	24
I.9.3. Résistance en traction par flexion.....	25
I.9.4. Conclusion.....	26
I.10. Comportement des dalles en béton armé.....	26
I.10.1. Poinçonnement des dalles.....	26
I.10.2. Mécanisme de rupture.....	27
I.10.3. Différents types de poinçonnement.....	28
I.10.4. Comportement en flexion des dalles en béton armé.....	29
a) Phase élastique linéaire.....	29
b) Phase de fissuration.....	29
c) Phase d'écoulement.....	29
d) Phase de rupture.....	29
I.10.5. Les avantages apportés par l'ajout de fibres métalliques sur les dalles en béton.....	30
I.11. Revues des travaux réalisés sur le comportement en poinçonnement et à la flexion des dalles en béton fibré.....	31
I.11.1. Essais de flexion des dalles renforcées par deux types de fibres KHALOO et AFSHARI.....	31
I.11.2. Comportement en flexion des dalles avec des composites polymères renforcés de fibres de verre et des barres d'acier.....	33
I.11.3. Conclusion.....	35
I.11.4. Essais de traction par flexion trois points.....	36
I.11.5. Comportement d'une dalle renforcée par matériaux composites sous	

chargement centré.....	38
I.11.6. Etude des dalles en béton de fibres métalliques à base de matériaux locaux.....	40
I.11.7. Influence du type de fibre sur le comportement en flexion des dalles.....	45
I.11.8. Conclusion.....	50
I.11.9. Comportement des dalles en béton renforcé par différents Matériaux Géosynthétiques.....	52

DEUXIEME PARTIE : METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

II. Introduction.....	56
-----------------------	----

Chapitre II : CARACTERISATION DES MATERIAUX DE RENFORTS UTILISES

II.1. Introduction.....	57
II.2. Essai de caractérisation des fibres en traction.....	57
II.3. Etude expérimentale.....	58
II.3.1. Géométrie de la fibre et système d'ancrage.....	59
II.3.2. Appareillage et essai.....	59
II.3.3. Présentation des résultats.....	60
II.3.4. Comportement des fibres métalliques en traction directe sous forme des histogrammes.....	62
II.4. Conclusion.....	64

Chapitre III : COMPORTEMENT EN FLEXION DES DALLES EN BETON RENFORCEES PAR DES FIBRES DE RECUPERATION

III.1. Introduction.....	66
III.2. Géométrie et composition des spécimens.....	66
III.2.1. Géométrie des éprouvettes.....	66
III.2.2. Composition des dalles.....	67
III.2.3. Confection des spécimens dalles et la mise en œuvre du béton.....	68
III.3. Essais de compression.....	70
III.4. Essais de flexion 3-points.....	73
III.4.1. Première série d'essais « série 1 ».....	73

III.4.2. Deuxième série d'essais « série 2 ».....	73
III.4.3. Résultats des essais de flexion 3-points.....	75
III.4.3.1. Première série d'essais « série1 ».....	75
III.4.3.2. Deuxième série d'essais « série2 ».....	77
III.5. Conclusion.....	81

Chapitre IV : ETUDE DE POINÇONNEMENT ET DE RESISTANCE A L'EFFET DE LA TEMPERATURE ELEVEE SUR LES DALLES EN BETON RENFORCEES AVEC DES FIBRES DE RECUPERATION

IV.1. Comportement en poinçonnement des dalles en béton renforcées par fibres de récupération.....	84
IV.1.1.Introduction.....	84
IV.1.2. Mode de chargement et acquisition.....	84
IV.1.3. Présentation des différents essais.....	85
IV.1.4. Première partie : Poinçonnement centré.....	85
IV.1.4.1. Première série d'essais (Série N°1).....	86
IV.1.4.2. Résultats et discussions.....	86
IV.1.4.3. Deuxième série d'essais (Série N°2).....	88
IV.1.4.4. Résultats et discussions.....	89
IV.1.4.5. Conclusion.....	91
IV.1.5. Deuxième partie : Poinçonnement excentré.....	92
IV.1.5.1. Troisième série d'essais (Série N°3).....	93
IV.1.5.2. Résultats et discussions.....	93
IV.1.5.3. Quatrième série (Série N°4).....	95
IV.1.5.4. Résultats et discussions.....	97
IV.1.5.5. Conclusion.....	99
IV.2. Effet de la température élevée sur le comportement du béton renforce par des fibres de récupération.....	100
IV.2.1. Introduction.....	100
IV.2. 2. Propriétés et dimensions des fibres utilisées.....	100
IV.2. 3. Confection des éprouvettes.....	101

IV.2. 4. Réalisation du béton de fibres métallique.....	101
IV.2. 5. Conservation des éprouvettes.....	102
IV.2. 6. Essais thermiques.....	102
IV.2. 7. Calcul des pertes de masse.....	103
IV.2. 8. Essais de compression.....	104
IV.2. 8.1. Principe de l'essai.....	104
IV.2. 8.2. Calcul de la Pertes de masse en compression.....	105
IV.2. 8.3. Résistance à la compression.....	105
IV.2. 9. Essais de flexion (flexion - 3points).....	108
IV.2.9.1. Géométrie et composition des éprouvettes.....	109
IV.2.9.2. Principe de l'essai.....	109
IV.2.9.3. Résultats des essais flexion 3-points.....	110
IV.2.9. 4. Calcul de la Pertes de masse en flexion.....	111
IV.2.9.5. Résistance à la flexion.....	111
IV.2. 10. Conclusion.....	114
CONCLUSION GENERALE.....	117
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	123

LISTE DES FIGURES

Figure	Nom de la figure	Page
Figure I.1	Différents types de fibres métalliques [11].....	9
Figure I.2	Les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres [13].....	13
Figure I.3	Processus de fissuration du béton [18].....	12
Figure I.4	Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite [20].....	12
Figure I.5	Rôle des fibres dans une matrice [23].....	14
Figure I.6	Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône d'ABRAMS [24].....	14
Figure I.7	Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'élancement L/D [25].....	15
Figure I.8	Effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [28].....	16
Figure I.9	Distribution de la contrainte de cisaillement à la surface d'une fibre Droite [31].....	17
Figure I.10	Géométrie d'une fibre décollée de matrice sur une longueur y [31].....	18
Figure I.11	Distribution des contraintes d'adhérence après décollement [31].....	18
Figure. I.12	Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturations [34].....	19
Figure I.13	Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de 1°C.mn [57].....	21
Figure I.14	Evolution de la résistance résiduelle à chaud relative en compression de béton pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique[57].....	21
Figure I.15	Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de béton pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [57].....	22
Figure I.16	Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température [57].....	23

Figure I.17	Essai de compression de béton de fibres polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300° [57].....	25
Figure I.18	Plancher dalle : (a)avant fissurations, (b) après fissuration [84].....	27
Figure I.19	Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement [87].....	28
Figure I.20	Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge [87].....	28
Figure I.21	Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé: (a)poinçonnement axisymétrique;(b) poinçonnement symétrique; (c) poinçonnement non symétrique; (d) poinçonnement excentré [86].....	28
Figure I.22	Phases successives du comportement d'une dalle en flexion [94].....	30
Figure I.23	Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (a) 30M Pa et jc25, (b) 30MPa et jc35 [27] métalliques [89].....	32
Figure I.24	Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (c) 45M Pa et jc25, (d) 45 MPa et jc35 [89].....	32
Figure I.25	Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (e) Dalle en béton sans fibres [89].....	33
Figure I.26	Endommagement des dalles GFRPS après chargement [90].....	34
Figure I.27	Endommagement des dalles GFRPS-F après chargement [90].....	34
Figure I.28	Endommagement des dalles SS après chargement [90].....	34
Figure I.29	Relations charge déplacement des dalles [90].....	35
Figure I.30	Influence de la teneur en fibres sur la résistance à la traction par flexion trois points des dalles [91].....	37
Figure I.31	Modes de rupture des dalles testées [91].....	37
Figure I.32	Schémas de renforcement des dalles [94].....	38
Figure I.33	Courbes charge flèche de la même dalle avec et sans renforcement [94].....	39
Figure I.34	Eprouvette testée en traction directe (photo de l'éprouvette et photo de l'essai) [95].....	41
Figure I.35	Évolution de la contrainte de traction (MPa) suivant le type du béton [95]....	41
Figure I.36	Courbe force – déplacement au centre de la dalle (moyenne de deux dalles) [95].....	42
Figure I.37 et I.38	Courbe force – déplacement au centre de la dalle (moyenne de deux dalles) [95].....	42
Figure I.39	Ligne de rupture est au milieu de la dalle [95].....	43
Figure I.40	La ligne de rupture est inclinée par rapport au milieu de la dalle	

	à un angle inférieur à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et au milieu pour les dalles sans fibres [95].....	44
Figure I.41	Deux lignes de rupture perpendiculaires et inclinées par rapport au milieu de la dalle à un angle inférieur à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et deux lignes de rupture perpendiculaire au milieu pour les dalles sans fibres [95].....	44
Figure I.42	Dispositif métallique en quatre appuis [95].....	45
Figure I.43	Courbe pression-flèche d'une charge uniformément répartie encastrée sur quatre appuis. [91].....	45
Figure I.44	Types de fibres : a) Fibres d'acier droites ; b) Fibre d'acier ondulée ; c) Fibre d'acier crochétée et d) Fibre de polyoléfine [101].....	46
Figure I. 45	Détails des dalles renforcées à double sens a) dalle avec ouverture et b) dalle pleine [101].....	47
Figure I. 46	Fissures et modèle de déformations pour une dalle pleine avec fibres polyoléfines [101].....	49
Figure I. 47	Effet du type de fibre sur la charge de fissuration [101].....	49
Figure I. 48	Charge-Déformation des dalles avec différents types de fibres, a) dalle de contrôle avec et sans ouverture ; b) Dalle avec fibre polyoléfine ; c) Dalle avec fibre d'acier ondulée et d) Dalle avec fibre d'acier droite [101].....	50
Figure I.49	Types de géogrilles utilisés [102].....	52
Figure I.50	Type de fibre de polypropylène [102].....	53
Figure I.51	Essai Geogrid en utilisant la méthode de traction multi-nervure [102].....	53
Figure I.52	Force-Contrainte pour trois types de géogrille testés [102].....	53
Figure II.1	Vue des fibres : a) grille grande mailles; b) grille petites mailles ; c) fibres métalliques d) dimensions de grille petite mailles ; e) dimensions de grille grande maille.....	58
Figure II.2	Système d'ancrage.....	59
Figure II.3	Vue du dispositif d'essai.....	60
Figure II.4	Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 30\text{mm}$	60
Figure II.5	Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 50\text{mm}$	60
Figure II.6	Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 70\text{mm}$	61
Figure II.7	Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 80\text{mm}$	61

Figure II.8	Superposition des courbes moyennes contrainte – déformation.....	61
Figure II. 9	Courbe moyenne contrainte-déformation pour les fibres polypropylène.....	62
Figure II.10	Histogramme pour L = 30mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.....	63
Figure II. 11	Histogramme pour L = 50mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.....	63
Figure II. 12	Histogramme pour L = 70 mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.....	64
Figure II. 13	Histogramme pour L = 80 mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.....	64
Figure III.1	Coffrage des dalles utilisées.....	67
Figure III.2	Dimensions des dalles utilisées.....	67
Figure III.3	Malaxeur à axe vertical de capacité 65 litres et le vibreur employé.....	69
Figure III.4.a)	Tube d’essai cylindrique.....	70
Figure III. 4.b)	Presse hydraulique.....	70
Figure III.5	Courbe moyenne contrainte – déformation d’essai 1.....	70
Figure III.6	Courbe moyenne contrainte – déformation d’essai 2.....	71
Figure III.7	Courbe moyenne contrainte – déformation d’essai 3.....	71
Figure III.8	Courbes contrainte déformation moyenne en compression.....	72
Figure III. 9	Disposition des grilles de petites mailles.....	73
Figure III.10	Disposition des grilles de grandes mailles.....	74
Figure III.11	Schéma statique de l’essai de flexion 3- points.....	74
Figure III.12	Dispositif et principe de support à 3-points.....	74
Figure III.13	Exemple de mode de rupture de la série 1.....	75
Figure III.14	Superposition des courbes force-flèche pour les dalles de la série 1.....	75
Figure III.15	Exemple de mode de rupture des poutres de la série 2.....	77
Figure III.16	Courbe Force-flèche pour le Béton témoin BT (W=0%).....	78
Figure III.17	Courbe Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène (GPP/PM).....	78
Figure III.18	Courbe Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène (GPP/GM).....	79
Figure III.19	Superposition des courbes Force-flèche des dalles renforcées par des grilles (GPP/PM) et (GPP/GM).....	79
Figure III.20	Superposition des meilleures courbes Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en Polypropylène et les fibres Métalliques (FM) et le BT...	81
Figure IV.1	Vue du dispositif d’essais.....	85
Figure IV.2	Essai de poinçonnement centré.....	86
Figure IV.3	Exemple de mode de rupture de la série 1.....	86

Figure IV.4	Superposition des courbes force-flèche pour les dalles de la série 1.....	87
Figure IV.5	Disposition des petits maillages.....	88
Figure IV.6.	Disposition des grands maillages.....	88
Figure IV.7	Exemple de mode de rupture de la série 2.....	89
Figure IV.8	Superposition de force-flèche courbes pour fibres de mailles polypropylènes (séries 2).....	89
Figure IV.9	Superposition de la meilleure résistance-flèche courbes de dalles renforcées avec des fibres de grille en Polypropylène et de fibres métallique.....	91
Figure IV.10	Position de la force excentrée suivant (x-x).....	92
Figure IV.11	Exemple de l'essai de poinçonnement excentré.....	93
Figure IV.12	Modes de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques sous un chargement de poinçonnement excentré.....	93
Figure IV.13	Superposition des courbes force-flèche pour les différents teneurs en fibres métalliques au poinçonnement excentre (série N°03).....	94
Figure IV.14 a)	Mode de rupture sur les parties supérieures, b) mode de rupture sur les parties inférieures des dalles renforcées avec des fibres en polypropylènes de petites mailles. (GPP/PM).....	96
Figure IV.15a)	Mode de rupture sur les parties supérieures, b) mode de rupture sur les parties inférieures des dalles renforcées avec des fibres en polypropylènes de grandes mailles. (GPP/GM).....	96
Figure IV.16	Superposition des courbes force-flèche des dalles renforcées par des grilles polypropylène au poinçonnement excentré (série N°04).....	97
Figure IV.17	Superposition des meilleurs courbes force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène, des es fibres métalliques et de béton témoin.....	98
Figure IV. 18	Vue des fibres: a) fibres métalliques (FM); b) fibres de polypropylène; c) dimensions des fibres polypropylène.....	100
Figure IV. 19	Malaxage de béton.....	101
Figure VI. 20	Malaxage du béton de fibres.....	102
Figure IV. 21	Cycles de chauffage – refroidissements imposés aux éprouvettes.....	103
Figure IV.22	Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.....	103
Figure IV.23	Éprouvette cylindrique.....	104
Figure IV. 24	Presses hydrauliques.....	104
Figure IV. 25	Pertes de masse des différents bétons étudiés.....	105

Figure VI. 26	Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=20°C.....	107
Figure VI. 27	Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=600°C.....	107
Figure VI.28	Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=800°C.....	107
Figure VI.29	Résistance à la compression des différents bétons étudiés.....	108
Figure IV.30	Schéma statique de l'essai de flexion trois points.....	109
Figure IV. 31	Moules prismatiques utilisés.....	109
Figure IV. 32	Dispositif de l'essai flexion 3 points.....	110
Figure IV. 33	Exemple des poutres testées à 20°C.....	110
Figure IV. 34	Exemple des poutres testées à 600°C.....	110
Figure IV. 35	Exemple des poutres testées à 800°C.....	110
Figure IV. 36	Pertes de masse des différents bétons étudiés.....	111
Figure IV. 37	Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 20°C.....	112
Figure IV. 38	Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 600°C.....	112
Figure IV. 39	Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 800°C.....	113
Figure IV. 40	Résistance à la compression des différents bétons étudiés.....	114

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Intitulé du tableau	Page
Tableau I.1	Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques [57].....	25
Tableau I.2	Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques [57].....	26
Tableau I.3	Programme expérimental [89].....	31
Tableau I.4	Géométries et propriétés des fibres métalliques [89].....	31
Tableau I.5	Résultats expérimentaux [90].....	35
Tableau I.6	Caractéristiques du renforcement des dalles testées [94].....	39
Tableau I.7	Caractéristiques des spécimens testés [94].....	39
Tableau I.8	Résultats des essais de compression et valeurs du module de Young des BFM [95].....	40
Tableau I.9	Propriétés des fibres utilisées [101].....	46
Tableau I.10	Résultats des essais de propriétés mécaniques des mélanges [101].....	48
Tableau II.1	Caractéristiques des propriétés mécaniques des fibres étudiées.....	58
Tableau III.1	Constituants du béton pour un volume de 1m ³ et la quantité correspondante pour un volume de [25x50x7]cm ³	68
Tableau III.2	Masse des différents teneurs en fibres pour 1m ³ de béton et pour une dalle [25x50x7] cm ³	68
Tableau III.3	Caractéristiques mécaniques du béton.....	72
Table III.4	Résistances à la rupture en flexion des dalles testées (série 1).....	77
Tableau III.5	Forces à la rupture en flexion des dalles testées (série 2).....	80
Tableau IV.1	Forces et les déformations à la rupture au poinçonnement des dalles	

	testées.....	88
Tableau IV. 2	Forces et les déformations à la rupture au poinçonnement des dalles testées (série2).....	90
Tableau IV. 3	Le nombre de fibres traversant les deux bords de la dalle pour chaque pourcentage en fibres.....	94
Tableau IV. 4	Résistance à la rupture au poinçonnement excentré des dalles testées (Série N°03).....	104
Tableau. IV. 5	Résistance à la rupture au poinçonnement excentré des dalles testées (série N°04).....	97
Tableau IV.6	Caractéristiques des propriétés mécaniques des fibres utilisées.....	100
Tableau IV.7	Masse de différents contenus de fibres pour 1m ³ de béton.....	100
Tableau IV.8	L'aspect des éprouvettes du béton en fibres à la sortie du four.....	106

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	Teneur en fibres.
V_{ebe}	Temps nécessaire pour le remoulage, dans un moule cylindrique posé sur une table vibrante, du béton déformulé 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.
BF2T	Béton dosé à 25kg/m ³ de fibres à deux têtes.
BF25	Béton dosé à 25kg/m ³ de fibres ondulées.
BF40	Béton dosé à 40 kg/m ³ de fibres ondulées.
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.

Deuxième partie : Etude expérimentale

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.
S_t	Espacement des armatures transversales.
f_e	Limite élastique des aciers.
F_m	Charge maximale.
R_m	Résistance en traction.

C_{\max}	Course maximum.
MF	Module de finesse.
$f'_c = \sigma'_{28j}$	Résistance visée à 28 jours.
K	Correcteur qui dépend du dosage en ciment.
$V_c, V_s \text{ et } V_G$	Volume absolu du ciment, du sable et du gravier.
FM	Fibres métalliques
GPP/PM	Les fibres en grilles de polypropylène à petites mailles.
GPP/GM	Les fibres en grilles de polypropylène à grandes mailles.
F_r	Force maximale à la rupture.
M_0	La masse de l'éprouvette à la température ambiante.
M_t	La masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Le béton s'est imposé comme un matériau de construction essentiel, largement utilisé dans diverses structures d'ingénierie. Le béton présente une résistance à la compression remarquable mais est susceptible de se fissurer sous l'effet de la tension en raison de sa faiblesse inhérente en tension. Le béton armé, combinant du béton avec un renforcement en acier, atténue ce problème en renforçant la résistance à la traction. Au cours des dernières décennies, le béton fibré (FRC) a attiré une attention croissante, trouvant des applications dans divers domaines de génie civil, notamment le béton projeté, les dalles de chaussées, les composants préfabriqués, les revêtements de tunnels, les structures sismiques, les réparations de tabliers de pont et les constructions marines et réfractaires (Brandt et al). L'ajout de fibres au béton armé présente plusieurs avantages, tels que l'augmentation de la capacité de charge, l'amélioration de la ductilité des éléments structurels, le contrôle de la propagation des fissures, l'augmentation de l'absorption d'énergie et la modification des modes de rupture [63]. De nos jours, l'incorporation de fibres dans le béton est de plus en plus répandue, surtout dans les structures fines. Elles peuvent soit se substituer aux armatures classiques, soit les compléter, en fonction du type de construction. Leur emploi dans les dalles et le béton projeté entraîne une augmentation de la productivité. En outre, ces fibres permettent de résoudre les problèmes de chocs et d'abrasion, ce qui se traduit par une amélioration de l'efficacité mécanique. Le béton armé de fibres a la capacité d'absorber plus d'énergie et offre une résistance élevée aux chocs et à la fatigue. Les fibres agissent sur le processus de fissuration, modifiant ainsi le comportement du matériau. La rupture devient alors ductile plutôt que fragile.

Cependant, l'incorporation des fibres dans le béton entraîne une amélioration significative de ses propriétés mécaniques. Ce procédé a donné naissance à un nouveau matériau présentant une résistance à la traction accrue, un comportement post-rupture satisfaisant et une homogénéité relativement uniforme dans toute la matrice.

Dans l'ensemble, les bétons de fibres ne peuvent pas actuellement remplacer complètement et de manière consensuelle les bétons armés traditionnels. Cependant, des chercheurs ont proposé de les intégrer aux bétons armés, en remplaçant partiellement les armatures traditionnelles, notamment en substituant aux armatures transversales. Ces initiatives ont ouvert la voie à une utilisation ciblée des propriétés des BFM dans divers domaines tels que la réparation des revêtements routiers, les dallages industriels, les pistes d'aérodromes et les

murs de soutènement. De plus, ce type de béton peut être exploité pour renforcer la résistance au feu du béton armé en limitant l'ouverture des fissures grâce aux fibres, protégeant ainsi les armatures traditionnelles contre le rayonnement thermique.

Dans le but de créer un matériau véritablement composite et d'améliorer ses performances en traction, des études expérimentales ont été entreprises pour substituer aux armatures traditionnelles du béton armé par des fibres capables de conférer au béton une résistance à la traction accrue, un comportement post-rupture amélioré et une homogénéité structurelle. Ces fibres sont intégrées dans le béton de manière plus ou moins aléatoire, tant en ce qui concerne leur orientation que leur positionnement. En effet, selon les applications pratiques, les fibres peuvent remplacer ou compléter les armatures traditionnelles.

L'exploration du comportement des dalles en béton armé soumises à des charges progressivement croissantes de flexion et de poinçonnement, qu'il soit centré ou excentré, reste un sujet d'actualité. Les récents incidents soulignent clairement l'importance de ce phénomène. La résistance au poinçonnement joue un rôle crucial dans la conception des dalles en béton, et le mode de rupture par poinçonnement demeure complexe. À ce jour, les mécanismes exacts de cette rupture demeurent partiellement compris, et des essais sont régulièrement menés pour approfondir notre compréhension de ce phénomène.

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 telles que : le remplacement des armatures transversales [36]. 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.

Cette étude expérimentale examine deux variétés de fibres "locales" utilisées pour renforcer le béton. Les fibres métalliques (FM) sont issues des déchets de pièces en acier, sous forme de "copeaux", récupérés à la société nationale des véhicules industriels en Algérie (SNVI). Leur forme géométrique ondulée en spirale assure une adhérence optimale dans la matrice

cimentaire. Les fibres à base de grilles en polypropylène se divisent en deux catégories : petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM).

Afin de suivre le comportement du renforcé avec deux types de fibres - les "copeaux" et les fibres à base de grilles en polypropylène - des essais mécaniques (traction directe, compression, flexion et poinçonnement centré et excentré) ont été réalisés sur des dalles à l'aide de machines au Laboratoire de Modélisation des Matériaux et Structures de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Dans le but de comprendre l'impact des températures élevées sur les propriétés mécaniques telles que la compression et la flexion, des essais ont été effectués sur des éprouvettes en béton renforcé avec des fibres métalliques (FM) à différents pourcentages de fibres (teneurs) ($W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et $W=1\%$) disposées aléatoirement dans la matrice cimentaire, ainsi qu'avec des fibres en polypropylène présentant deux variantes de grilles : petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM). Ces fibres en grille de polypropylène sont placées en deux couches sur la hauteur des dalles.

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.

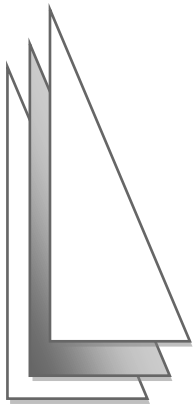
Le deuxième chapitre se concentre sur la caractérisation expérimentale du comportement mécanique des fibres en spirales ondulées, également connues sous le nom de « copeaux », issues des déchets d'usinage d'acier. Cette caractérisation est réalisée sous des sollicitations statiques, en particulier la traction unie axiale. L'objectif principal est d'optimiser à la fois la longueur des fibres et le nombre d'ondulations à utiliser dans une matrice cimentaire, afin d'améliorer les performances mécaniques, notamment la résistance. De plus, cette étude inclut la caractérisation en traction des fibres fabriquées à partir de grilles en polypropylène.

Nous utilisons la méthode "Dreux-Gorisse" pour calculer les masses des différents composants du béton pour un volume de 1m^3 .

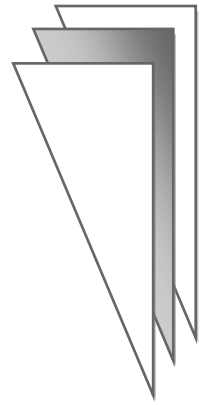
Le troisième chapitre se concentre sur l'étude du comportement en flexion des dalles en béton renforcées par des fibres de récupération, avec deux types de renforcement : les fibres métalliques (FM) et les fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM), dans le but de tracer les courbes (forces-flèches).

Le quatrième chapitre consiste à réaliser des essais afin d'observer le comportement des dalles en béton renforcées par des fibres métalliques (FM) et des polypropylènes de petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) au poinçonnement centré, ainsi que des essais pour étudier le comportement des dalles sous poinçonnement excentré. Une partie de ce chapitre examine comment la température affecte le comportement du béton renforcé par des fibres de récupération. L'étude expérimentale vise à analyser l'effet des températures élevées sur des propriétés mécaniques telles que la compression et la flexion, en se concentrant sur le béton renforcé par des fibres métalliques (FM) ainsi que par des polypropylènes à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM).

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



CHAPITRE I



Étude bibliographique

PREMIERE PARTIE : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**CHAPITRE I****ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE****I.1. Introduction**

Depuis le début des années soixante beaucoup de recherches sont faites sur le béton de fibres, notamment en ce qui concerne ses propriétés mécaniques et le procédé de sa mise en œuvre. Il ressort de ces travaux [1] que ce composite présente une bonne résistance à la traction et surtout un comportement ductile après la première fissuration. De par ses propriétés, l'utilisation du béton de fibres est orientée principalement vers la réalisation d'éléments et plaques minces telles que ; les dallages industriels, les routes, les pistes d'aéroport, les murs de soutènement, les pieux, les murs de façade...

Les fibres utilisées comme moyen de renforcement du béton sont les fibres en acier, verre, fonte, polypropylène et matière plastique. Cependant, les plus utilisées sont les fibres métalliques.

I.2. Composition du béton

La composition du béton a une grande influence sur ses caractéristiques ; le choix de la formulation a un impact direct sur les résistances. Le béton est un matériau composite obtenu à partir d'un mélange de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable) liés entre eux par un liant hydraulique (une pâte de ciments + eau), avec des adjuvants et des additions pour améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I.3. Matériaux composites

La composition du béton a une grande influence sur ses caractéristiques ; le choix de la formulation a un impact direct sur les résistances. Le béton est un matériau composite obtenu à partir d'un mélange de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable) liés entre eux par un liant hydraulique (une pâte de ciments + eau), avec des adjuvants et des additions pour améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Les composites s'adaptent à toutes les formes de supports et ne requièrent aucun placage sous pression, grâce à leur souplesse, leur légèreté et la facilité de mise en forme qui peut s'adapter à tous les ouvrages de formes complexes [3].

I.3.1. La Constitution des matériaux composites

En général, les constituants principaux d'un matériau composite sont : la matrice et le renfort (fibres). Dans certains cas, des charges et des additifs peuvent être utilisés.

I.3.1.1. La matrice

La matrice est un matériau isotrope, leur utilisation dans les composites permet de coller des fibres entre elles, de transmettre les efforts aux fibres et d'assurer une protection des fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques.

La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion chimique [4] et [5].

Deux grandes familles de matrices en résine polymère sont largement connues: Les résines thermoplastiques (TP) et les résines thermodurcissables (TD). Il y a aussi les élastomères, qui sont utilisés parfois dans l'industrie automobile [6], [7] et [2].

I.3.1.2. Renforts

Les renforts (fibres) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Les avantages des fibres sont : Propriétés physico-mécaniques intéressantes, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc.... [2].

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origine et de formes diverses.

Néanmoins, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue. Ils sont caractérisés par la nature de la fibre (minérale ou organique) et de l'architecture du renfort. Ils constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 30% et 70% [9] et [10].

I.3.2. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques, notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton.

Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton (Figure I.1) [11]:

- fibres ondulées - crantées - torsadées droites;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc.

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur sol ou sur pieux), pour la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement en béton), pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure.

En effet, elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la microfissuration).

Elles se substituent partiellement aux armatures traditionnelles. Dans certains cas, pour des bétons subissant de faibles sollicitations, elles peuvent même remplacer complètement les armatures.

Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture.

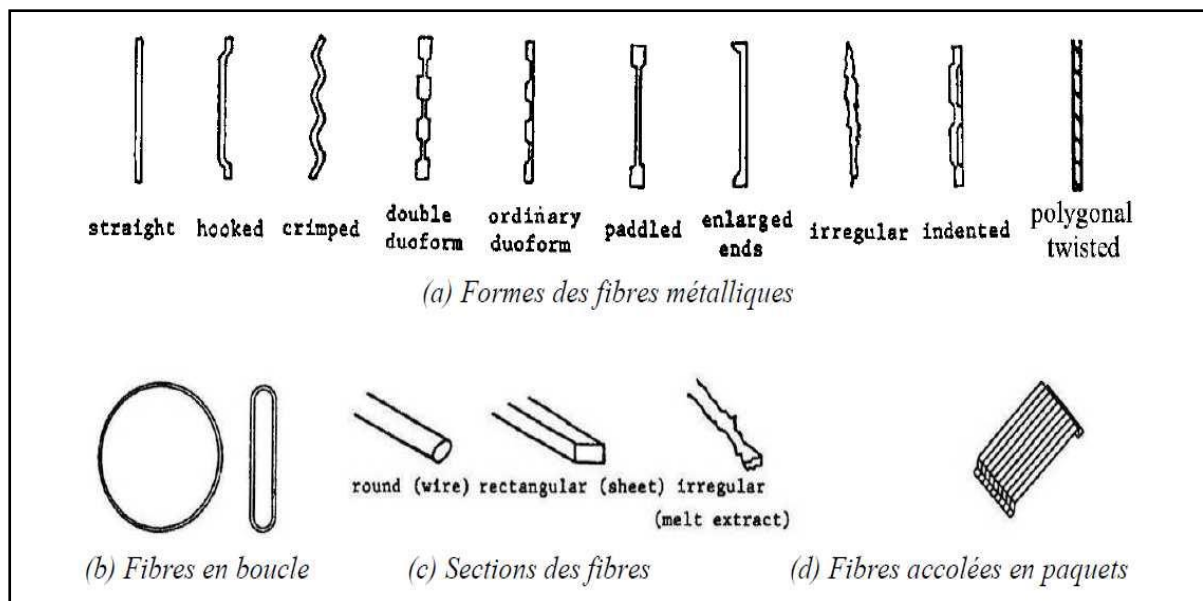


Figure I.1 Différents types de fibres métalliques [11].

I.3.3. Les fibres Polypropylènes

Fibres synthétiques de polypropylène modifié pour une utilisation dans le béton et les mortiers renforcés de fibres. Les fibres de polypropylène réduisent la formation de fissures de retrait plastique sur le béton et augmentent l'impact et la résistance aux chocs. Les fibres synthétiques augmentent également la résistance à l'abrasion dans les planchers en béton et

réduisent le saignement. De plus, ils améliorent l'élasticité et la cohésion des mortiers et des chapes lors de la mise en place [12].

Les fibres de polypropylène sont spécialement conçues afin d'être utilisées dans les cas où des fissures sont créées en raison du retrait ou des déformations plastiques, par exemple en cas de grandes dalles de béton, des éléments préfabriqués en béton, des planchers chauffants, etc. Ils sont utilisés là où la cohésion des chapes ou du béton est nécessaire lors de la mise en place, par exemple en cas de dalles inclinées, etc. Les fibres de polypropylène sont également utilisées dans des applications de béton projeté (gunite) afin d'augmenter le compactage et la densité du béton projeté.

Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs.

De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène:

- dallages et aménagements urbains ;
- produits préfabriqués (parements) ;
- mortiers projetés ;
- enduits ;
- sculptures.

Les propriétés des fibres polypropylène sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (meilleur comportement du béton frais) et les éléments préfabriqués (meilleure résistance mécanique au jeune âge). Elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées. Elles permettent de réaliser des parements esthétiques, avec des motifs très précis, et sont utilisées aussi pour la formulation des bétons projetés ou des mortiers de réparation.

I.4. Spécificité du comportement des bétons avec des fibres

Si l'on applique un effet de traction au béton fibré, il se comporte avant rupture selon trois phases :

- Les fibres et le béton agissent ensemble dans une phase élastique ;
- Des microfissures se produisent, l'effort de traction est repris par les fibres qui limitent la propagation de la fissuration ;
- Les fissures se développent, les fibres perdent leur adhérence avec la matrice.

Toute fibre qui traverse une fissure créée en quelque sorte un « pont » entre les deux bords de la fissure. Ce pont va permettre le transfert d'une partie de la contrainte ayant entraîné l'ouverture de la fissure. C'est ainsi qu'une fibre s'oppose à l'élargissement de la fissure,

jouant véritablement le rôle d'une couture et augmente la résistance du béton après fissuration.

Les fibres permettent donc de "coudre" les microfissures et évitent leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macro fissures.

Elles apportent des caractéristiques mécaniques post-fissurations au béton.

Du fait de leurs propriétés, les fibres métalliques trouvent un vaste domaine d'application, si l'on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour optimiser le dimensionnement des pièces.

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [13]. La Figure I.2 illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.

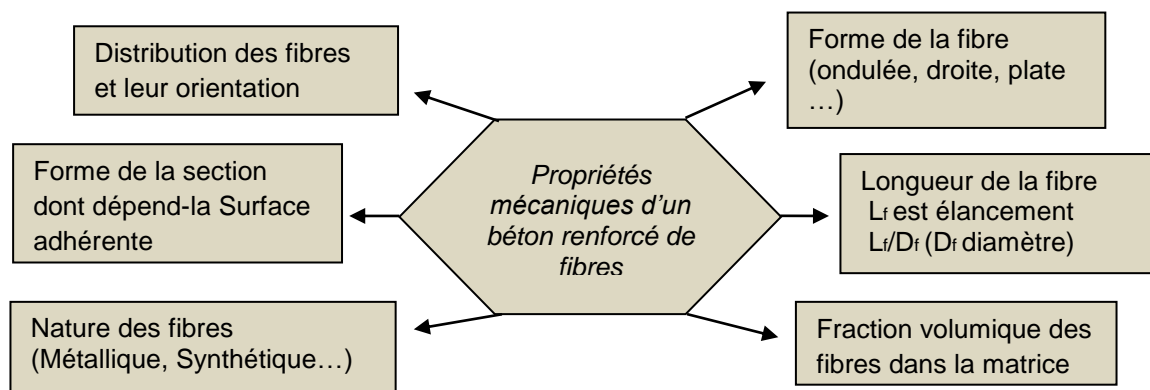


Figure I.2 Les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres [13].

On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable.

I.5. Principe d'action des fibres

D'après [14], le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles : le matériau et la structure. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (Figure I.3) [93]. Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (auréoles de transition). La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du

micromètre. Durant cette phase, les fibres sont inactives. La deuxième phase correspond au développement des macros fissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une macro fissure (phase 3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette [15], [16] et [17].

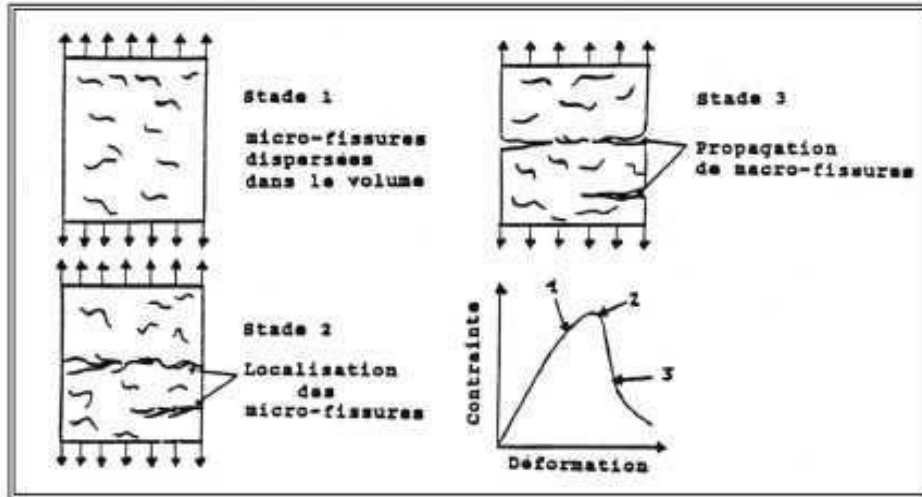


Figure I.3 Processus de fissuration du béton [18].

La Figure I.4 illustre le principe de couture des fibres à travers une fissure dans la matrice [19] et [20].

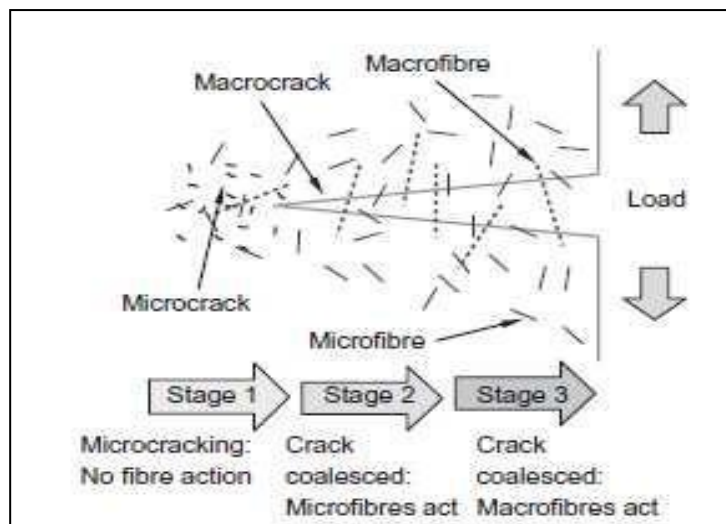


Figure I.4 Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite [20].

Le mécanisme de couture des fibres assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et confère ainsi une ductilité au béton [21].

I.6. Rôle des fibres dans le béton

Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de " couture " des fissures. En effet, la longueur maximale d'une microfissure est de l'ordre de la dimension du plus gros granulat

ROSSI [22]. La longueur moyenne des fibres utilisées est nettement supérieure à la dimension du plus gros granulat. Chaque microfissure se propageant dans la pâte, peut être "pontée" par une ou plusieurs fibres. Ainsi les fibres empêchent la propagation des microfissures qui ne peuvent de ce fait s'agrandir que par :

- allongement élastique ou plastique des fibres ;
- effritement de la matrice de béton au voisinage de la fibre ;
- glissement des fibres ;
- rupture des fibres.

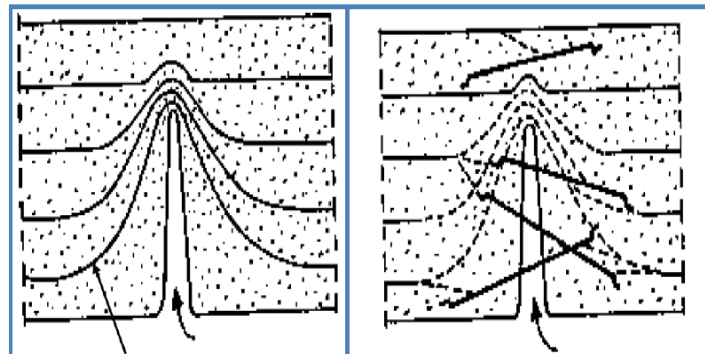
L'agrandissement des microfissures dans la direction principale de traction conduit à la localisation des macros fissures, alors les fibres qui relient les lèvres de ces fissures, sont soumises à la traction et au cisaillement, elles sont ainsi sollicitées à l'arrachement. Ces fibres absorbent une partie de l'énergie nécessaire à la propagation des microfissures et évitent une propagation incontrôlée de la fissuration du béton. Il faudrait davantage d'énergie donc davantage d'effort pour propager cette fissuration.

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 (Figure I.5).

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 [23].

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 [23].



Lignes de tension déviées Amorce de la fissure Fissure traversée par des fibres

Figure I.5 Rôle des fibres dans une matrice [23].

I.7. Influence des fibres noyées dans le béton

I.7.1. Influence de 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) [24].

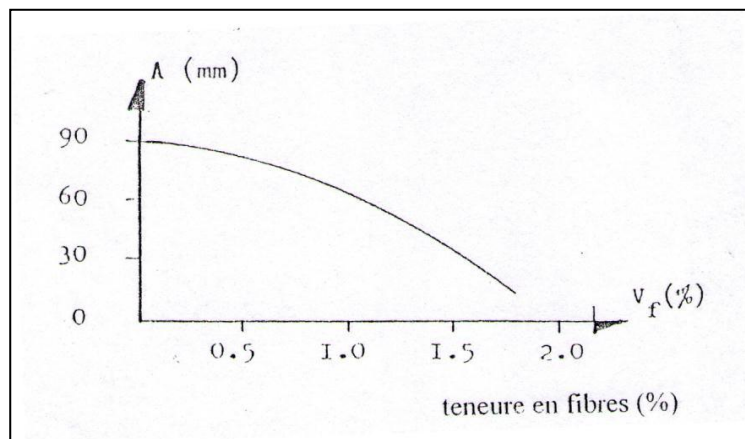


Figure I.6 Effet des fibres incorporées dans le béton sur son affaissement au cône d'ABRAMS [24].

EDINGTON et al [25] ont montré la diminution de la maniabilité du mélange en augmentant le dosage en fibres (Figure I.7).

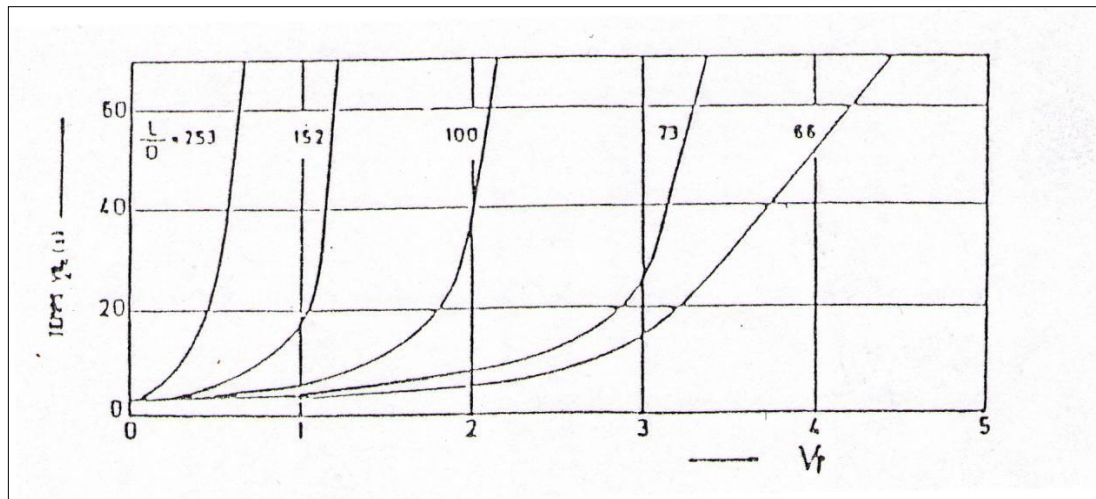


Figure I.7 Ouvrabilité du béton de fibres en fonction de teneur en fibres métalliques et l'élongement L/D [25].

V_f : pourcentage en fibres.

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

I.7.2. 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 [26], 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 [27] 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 [28] permet de mettre en évidence l'effet de l'orientation des fibres sur la résistance du composite à la traction (Figure I.8).

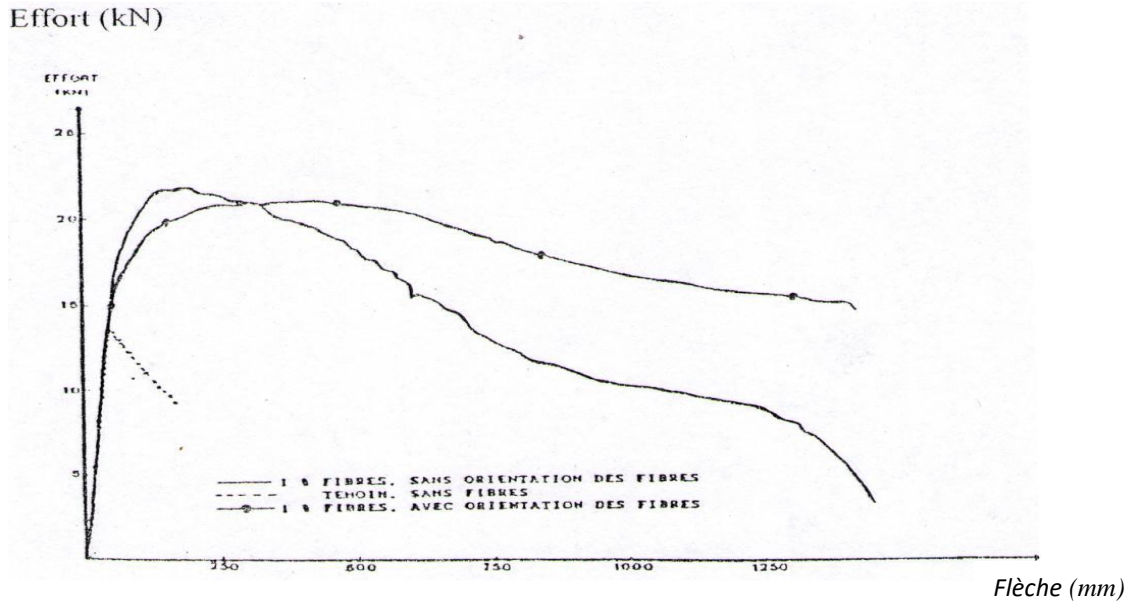


Figure I.8 Effet de l’orientation des fibres sur la résistance du composite (béton de fibres) en flexion [28].

I.7.3. Distribution des fibres

Lors des applications industrielles, il convient de contrôler la distribution réelle des fibres dans le composite. On examine le nombre de fibres dans une section et on le compare au pourcentage théorique des fibres pour s’assurer de l’homogénéité de la distribution des fibres. Il est alors indispensable de connaître le nombre de fibres correspondant au pourcentage théorique des fibres que l’on donne au mélange.

Selon une analyse théorique, SOROUSHIAN [29] propose une formule pour le calcul du nombre de fibres dans une section par unité de surface.

$$N = \alpha \cdot \omega / A_f \dots \dots \dots (I.1)$$

- α: Facteur d’orientation des fibres ;
- ω: Pourcentage en volume des fibres ;
- A_f: Surface de la section d’une fibre.

I.7.4. Influence de l’adhérence fibre matrice de béton

L’adhérence fibre matrice de béton est un facteur très important vis-à-vis de l’efficacité des fibres dans le béton. D’après BARTOS [30], elle est assurée par trois types de liaisons :

- Une liaison élastique, collage entre fibres et matrices par les liants ;
- Une liaison due au frottement ;
- Une liaison due à l’ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets, ondulations ...).

Pour quantifier cette adhérence, l'essai d'arrachement des fibres est fréquemment utilisé. Cette résistance notée τ_u correspond à la contrainte maximale de cisaillement qui se développe à la surface de la fibre lors de l'arrachement de celle-ci (Figure I.9) [31].

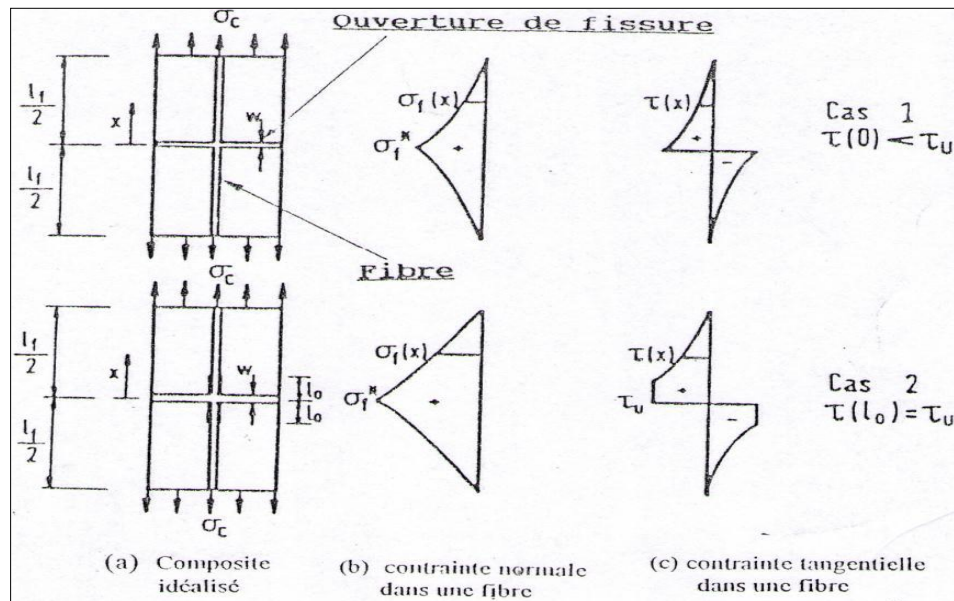


Figure I.9. Distribution de la contrainte de cisaillement à la surface d'une fibre Droite [31].

Le même auteur remarque que la contrainte d'adhérence τ_u pour une fibre droite varie entre 2 et 3MPa, par contre celle dans le cas d'une fibre à crochets aux extrémités elle peut atteindre 6 à 7MPa.

I.7.5. Mécanisme de rupture d'une fibre dans la matrice

La résistance à la fissuration et la résistance ultime du composite dépendent du transfert des efforts matrice fibre. Lorsque la fibre est soumise à un effort d'arrachement, le transfert des charges à l'interface s'effectue par les contraintes d'adhérence. La distribution de ces contraintes le long des parties ancrées des fibres associées aux modèles de comportements utilisés peut être éventuellement confirmée par des essais simples comme celui de « pull out ». Ces essais peuvent nous ramener à déterminer des relations entre divers paramètres géométriques et mécaniques utilisables et permettre de définir et déterminer les coefficients d'efficacité des fibres (voir Figures I.10 et I.11) [31] et [32].

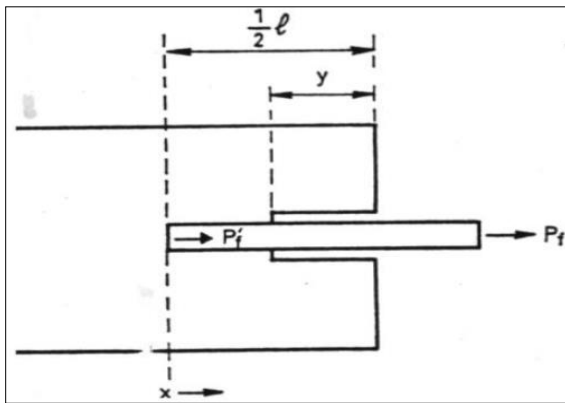


Figure I.10 Géométrie d'une fibre décollée de matrice sur une longueur y [31].

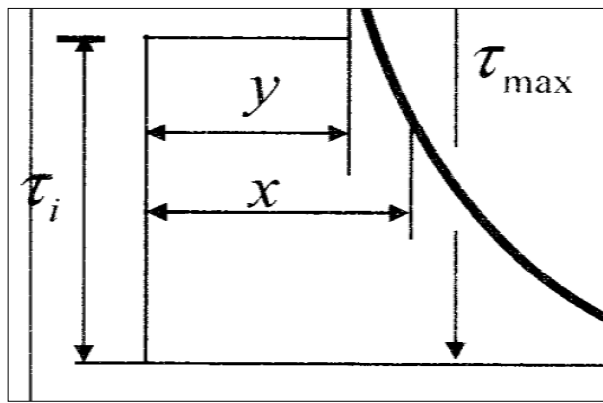


Figure I.11 Distribution des contraintes d'adhérence après décollement [31].

Le modèle mathématique associé au mécanisme du décollement des fibres suppose un comportement élastique de la matrice et des fibres, lorsque le composite est soumis à un effort de traction. Les contraintes latérales de la matrice et des fibres sont eues négligé, c'est-à dire que le transfert des contraintes de la matrice vers les fibres se traduit uniquement par des contraintes de cisaillement à l'interface fibre matrice [31] et [32].

Les Figures I.10 et I.11 schématisent le principe de ce concept. Le mécanisme du décollement et de la rupture de la fibre.

D'autres théories basées sur des modèles mathématiques purs ou bien sur des simulations ont été rapportées. Mais en général, ces modèles et ces théories ont permis de bien comprendre le comportement de la fibre ancrée dans une matrice durcie.

I.7.6. 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 (Etuvage) 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 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 déverglaçage des chaussées, des pistes d'aéroports et manifestement pour le chauffage des bâtiments.....etc (Figure I.12) [34].

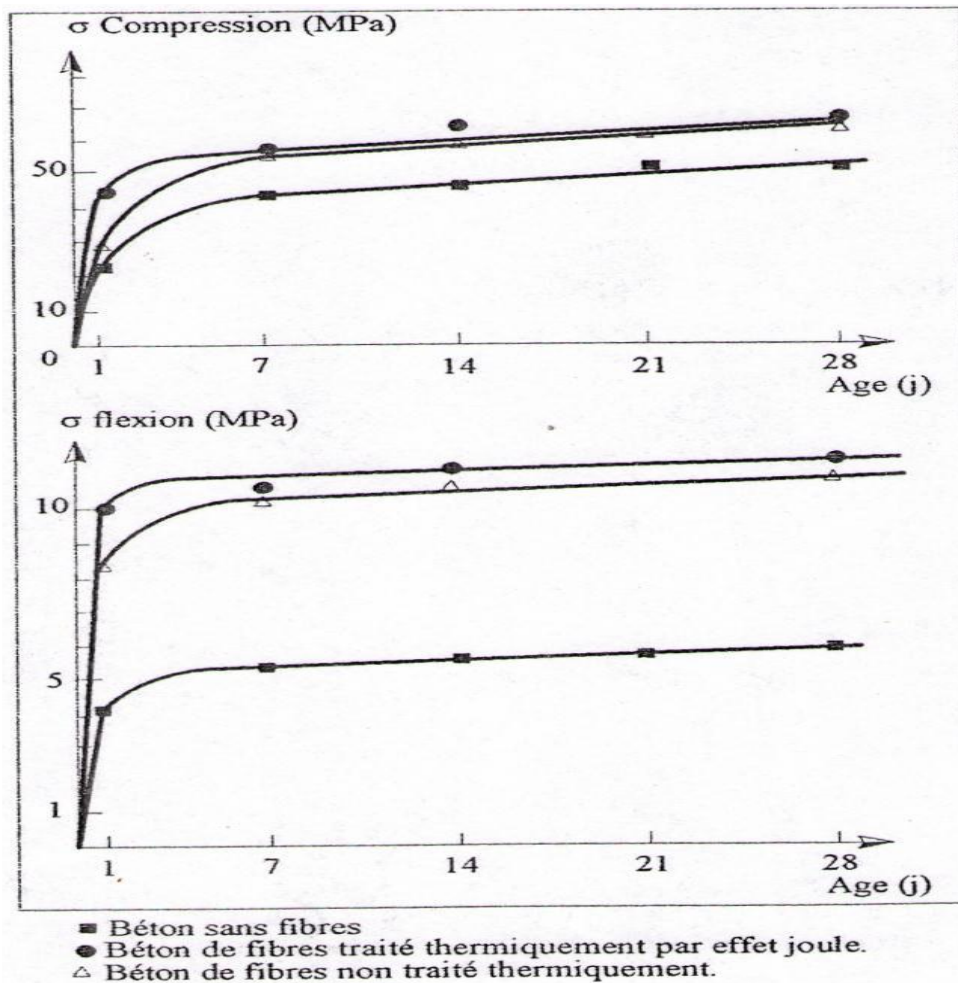


Figure. I.12 Variation des résistances mécaniques des bétons avec ou sans fibres à crochets en fonction de l'âge et du mode de leurs maturations [34].

I.7.7. Conclusion

La géométrie des fibres, leur adhérence avec la matrice de béton, leur pourcentage et leur orientation jouent un rôle important dans l'efficacité des fibres dans le béton. En effet, une bonne orientation des fibres optimise leur participation à la reprise des efforts. La géométrie variable permet un bon ancrage des fibres et augmente ainsi l'effort nécessaire à leur arrachement. Néanmoins la croissance du pourcentage en fibres entraîne une diminution de l'ouvrabilité.

I.8. Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée

L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton améliore sa stabilité thermique. Elles fondent et s'évaporent, générant un canal qui facilite le transport de flux hydriques. L'étude des bétons contenant des fibres montre, en présence du polypropylène, une baisse de pic de

pression de vapeur avec la montée en température. Cette diminution est liée au volume de fibres.

L'analyse des propriétés mécaniques des bétons de fibres de polypropylène en fonction de la température conduit à des avis divergents. Certains auteurs HAMMER [77], KOMONEN et AL [78], constatent une amélioration des propriétés mécaniques en présence des fibres de polypropylène.

Ce gain de résistance est attribué à l'évacuation rapide de l'eau du matériau et la réduction des pressions induites lors de la montée en température.

I.8.1. Sur l'instabilité thermique

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour lutter contre la fissuration du béton à l'état frais. Elles permettent de renforcer le béton avant durcissement et d'éviter ainsi la fissuration de retrait au très jeune âge. Leur domaine d'application s'est élargi à la prévention du phénomène d'éclatement des BHP à une température élevée.

HAMMER [77], KOMONEN et AL [78], et d'autres auteurs ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. La première utilisation des fibres de polypropylène datent des années 1995 (Japan Centre, Frankfur, Allemagne). Cette technique de prévention est d'ailleurs recommandée par l'Eurocode2 [64]. La quantité minimale de fibres de polypropylène permettant d'éviter le risque d'éclatement est de l'ordre de 0.20 % du volume de béton [79].

I.8.2. Sur la perte de masse du béton

Lors de la montée en température, le béton perd de la masse, en rapport au départ de l'eau sous forme libre ou liée. La figure I.13 illustre l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [57].

L'évolution de la perte de masse est la même pour tous les bétons.

La courbe d'évolution de la perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs.

- De la température ambiante à 120°C : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires [66] ;

- De 120°C à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide.

Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [57] ;

• Au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de des hydroxylations de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [80] et [57].

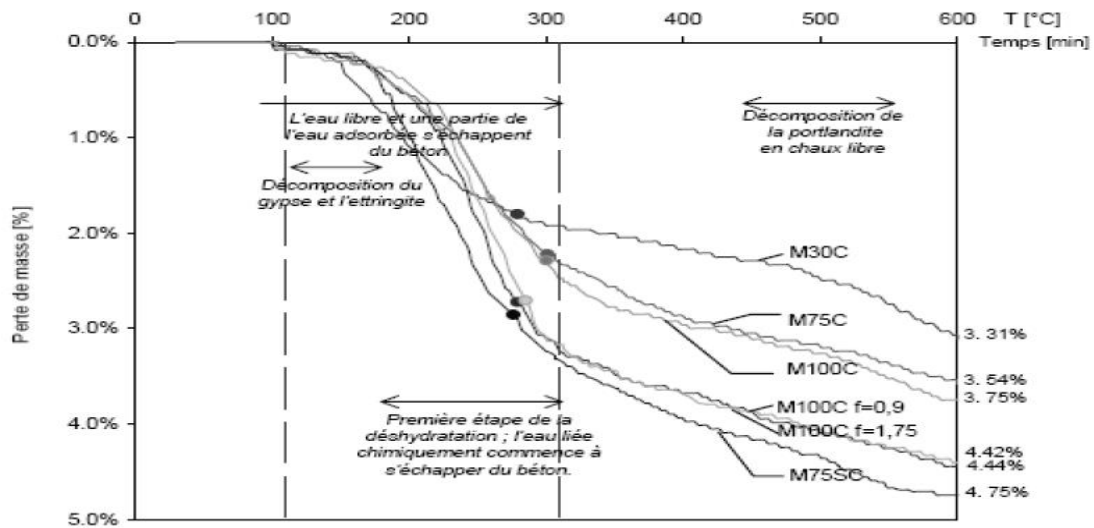


Figure I.13 Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de 1°C.mn⁻¹ [57].

I.8.3. Résistance en compression

A la température ambiante, les résistances en compression varient peu pour des dosages inférieurs à 3kg/m³ de fibres [66]. Les résultats obtenus par HAGER [57] montrent au contraire une baisse de résistance de 17% et 25% pour des bétons contenant respectivement 1.75kg/ m³ et 0.9kg/ m³ de fibres de polypropylène malgré l'augmentation de 10% de la pâte de ciment dans la composition des bétons fibrés. L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température des bétons de fibres de polypropylène varie suivant les auteurs. La Figure I.14 rassemble les résultats obtenus par différents auteurs.

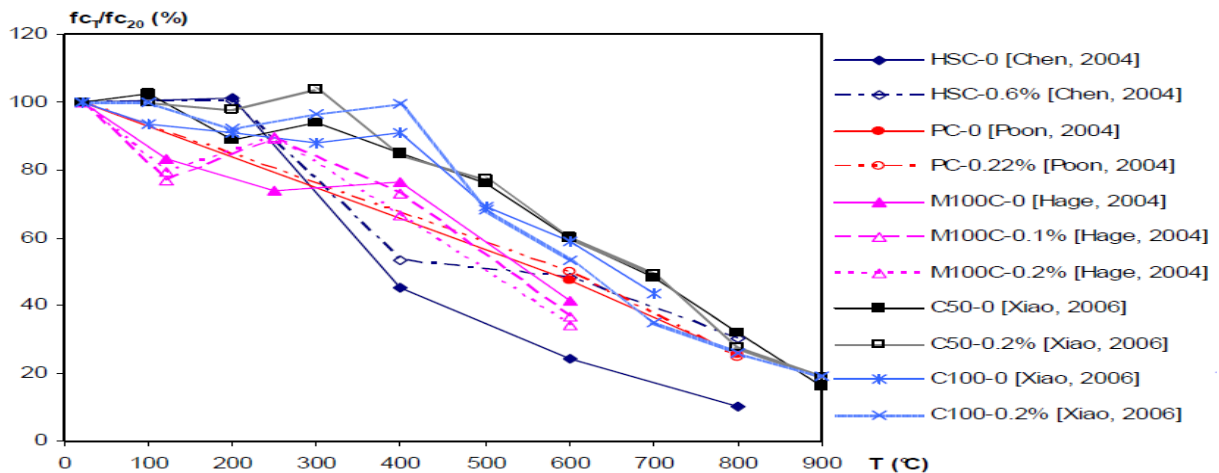


Figure I.14 Evolution de la résistance résiduelle à chaud relative en compression de béton pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [57].

I.8.4. Résistance en traction par flexion

La résistance résiduelle en traction des bétons fibrés de polypropylène diminue en fonction de la température comme pour les bétons non fibrés. La Figure I.15 illustre l'évolution de la résistance résiduelle relative à la traction obtenue par différents auteurs.

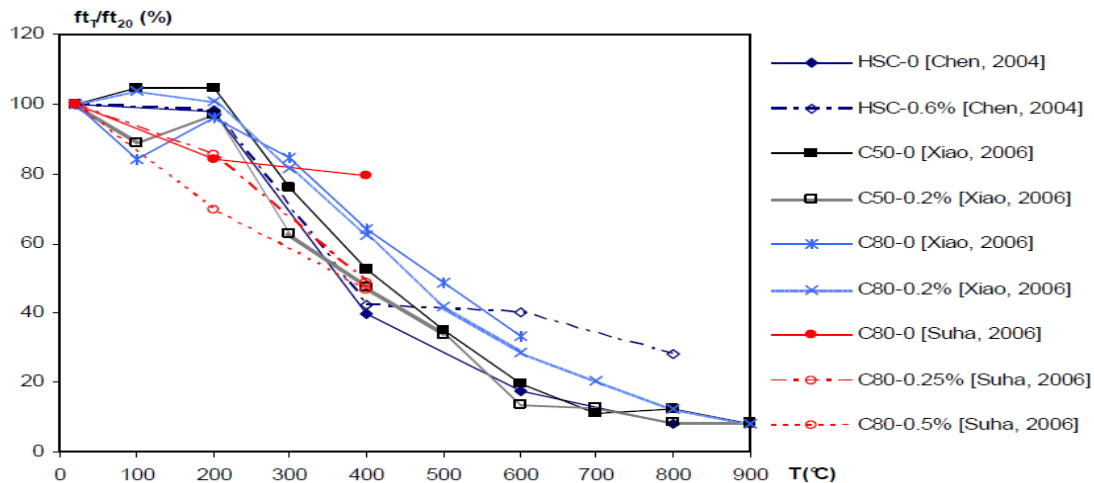


Figure I.15 Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de béton pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [57].

I.9. Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée

L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton porté à une haute température montre pour certains auteurs une instabilité thermique à une température peu élevée (inférieure à 200°C) ou une instabilité retardée (à partir de 800°C). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine des différences observées : le mode de cure des éprouvettes (éprouvettes sèches ou saturées), la vitesse de chauffage, la teneur en fibres qui semble être un facteur prépondérant. Plus la teneur en fibres métalliques est élevée, plus il y aura un risque de répartition hétérogène des fibres voire la floculation des fibres. La forte quantité de fibres peut aussi générer un gradient thermique supplémentaire qui engendrerait le phénomène d'instabilité thermique. Les résultats des travaux de [81] montrent que l'ajout de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques ne permet pas d'améliorer de façon significative les propriétés mécaniques résiduelles du béton chauffé jusqu'à 400°C. L'influence positive des fibres métalliques est observée. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats notamment sur l'amplitude du gain apporté par les fibres métalliques varient suivant les auteurs. Une convergence des résultats de l'influence des fibres métalliques sur le comportement résiduel du béton n'apparaît pas encore à travers la littérature.

I.9.1. Perte de masse

La présence de fibres métalliques dans le béton ne modifie pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau. Comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène, on distingue sur la courbe trois domaines différents : une faible perte de masse entre 20°C et 150°C et entre 300°C et 600°C, une perte de masse importante entre 150°C et 300°C (Figure I.16).

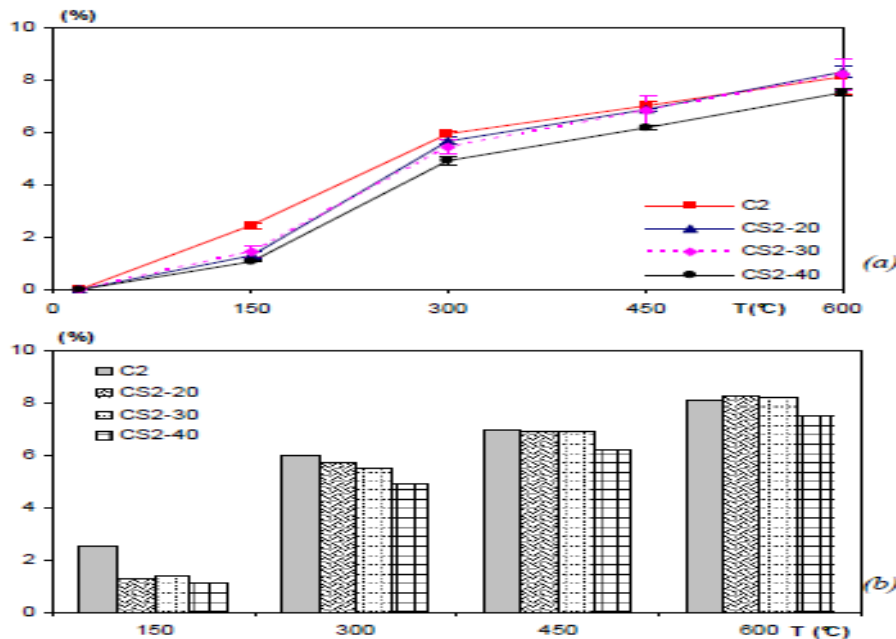


Figure I.16 Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température [57].

Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres. On observe une diminution plus importante après le chauffage à 150°C ; la perte de masse des bétons C2 et CS2-20 est respectivement 2.5% et 1.3%. Cette variation peut être due à la précision de la température de chauffage du four (au palier de 150°C) [57].

Au-delà de la température 150°C, on remarque toujours une diminution de perte de masse des bétons de fibres métalliques mais moins importante. Après le chauffage à 600°C, les pertes de masse des bétons C2, CS2-20, C3 et CS3-20 sont respectivement 8.1%, 8.3%, 7.2% et 6.9%.

Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. La composition des bétons de fibres métalliques est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats. Les granulats sont humides au moment de la fabrication du béton. Le remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée. La quantité d'eau pouvant être absorbée par les granulats substitués varie de 0.1 à

0.2% pour le béton C2 et de 0.2 à 0.4% pour le béton C3. La baisse de perte masse au-delà du chauffage à 150°C se retrouve dans cet ordre de grandeur [57].

La perte de masse des bétons CS3 est inférieure à ceux des bétons CS2. A la température 600°C, la perte de masse du béton CS3-30 est de 6.8% et celle du béton CS2-30 est de 8.2%

I.9.2. Résistance en compression

Le tableau I.1 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des différents bétons de fibres métalliques CS2 et CS3. Chaque valeur est la moyenne réalisée sur trois éprouvettes. La figure I.17 montre l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température de chauffage des bétons CS2 et CS3. La résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres et avec les fibres de polypropylène : peu de pertes, voire un gain de résistance avant 300°C, puis une chute rapide de résistance.

Les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression à la température ambiante que le béton sans fibres. Ce gain de résistance est plus remarquable avec les bétons CS3. On note une influence de la variation de la proportion de fibres. Cette amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres métalliques est observée pour tous les cycles de chauffage refroidissement. Les résistances des bétons C2 et C3 restent toujours inférieures à celles des bétons CS2 et CS3 (Tableau I.3) Après chauffage à 450°C, contrairement aux bétons sans fibres ou avec les fibres de polypropylène, les bétons de fibres métalliques conservent plus de 50% de leur résistance initiale. La résistance résiduelle relative moyenne des bétons CS2 est de 65% et celle des bétons CS3 est de 57% (C2 : 44% et C3 : 38%). Le gain de résistance résiduelle en compression est quasiment du même ordre de grandeur pour les deux familles de béton de rapports E/C différents. Le gain de résistance relative est de 21% pour le béton CS2 et 18% pour le béton CS3 après chauffage à 450°C.

Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons CS2-20 et CS3-20 est respectivement de 16% et 19%. Avec un dosage minimum de 20 kg/m³ de fibres métalliques, la résistance résiduelle s'améliore (C2 : 12% et C3 : 13%). La résistance résiduelle augmente avec le dosage en fibres. La résistance résiduelle relative des bétons CS2-40 à la même température est de 25% [57].

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	MPa	57.9	51.2	56.0	36.3	9.0
CS2-20	Ecart type	2.0	1.8	3.9	2.8	0.5
	(%)	100	89	97	63	16
CS2-30	MPa	57.7	46.8	54.8	37.5	10.2
	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
CS2-40	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
	(%)	100	81	95	65	18
C3	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
CS3-20	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
	(%)	100	80	93	67	25
CS3-30	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	Ecart type	69.7	69.9	71.3	43.5	13.4
CS3-40	Ecart type	4.9	3.4	3.1	2.7	0.3
	(%)	100	100	102	62	19
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	15.1
	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
CS3-40	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
	(%)	100	91	99	49	20
CS3-40	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
CS3-40	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
	(%)	100	89	102	60	19

Tableau I.1 Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques [57].



Béton CP3-2 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.



Béton CS3-30 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.

Figure I.17 Essai de compression de béton de fibres polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300° [57].

I.9.3. Résistance en traction par flexion

Le Tableau I.2 rassemble les valeurs moyennes des résistances résiduelles et relatives en traction par flexion mesurée sur des éprouvettes prismatiques de section 10 x 10 x 40cm.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	4.3	4.6	2.6	1.4
CS2-20	Ecart type	0.7	0.2	0.7	0.3	0.2
	(%)	100	84	91	52	28
CS2-30	MPa	6.4	4.4	4.8	4.0	1.7
	Ecart type	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
CS2-40	MPa	5.8	5.3	5.3	3.5	2.4
	Ecart type	0.8	0.9	1.7	0.1	0.4
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	7.2	5.6	6.2	3.8	2.5
CS3-20	Ecart type	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4
	(%)	100	77	86	52	35
CS3-30	MPa	6.7	6.9	5.4	3.1	2.4
	Ecart type	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4
CS3-40	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
	Ecart type	0.1	0.9	0.9	0.7	0.3
CS3-40	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
	(%)	100	109	83	73	38

Tableau I.2 Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques [57].

I.9.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux de recherche déjà réalisés sur l'influence des fibres de polypropylène et des fibres métalliques sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé.

I.10. Comportement des dalles en béton armé

Les dalles en béton armé, lorsqu'elles sont soumises à des charges ponctuelles, développent des résistances plus ou moins faibles. La rupture par poinçonnement ou cisaillement est due à l'effort tranchant développé dans la zone fortement comprimée [1].

I.10.1. Poinçonnement des dalles

La résistance au poinçonnement constitue un paramètre important dans la conception des dalles en béton. Sous l'effet d'une charge concentrée (poinçonnement), des efforts tranchants très importants sont développés dans la dalle. La distribution de ces efforts tranchants est de forme hyperbolique, maximale au nu de la colonne [82].

Généralement, des efforts de flexion accompagnent les efforts tranchants. Ainsi, des ruptures dites par flexion poinçonnement peuvent être présentes dans certains cas. Ce terme signifie que le mode de rupture final est par poinçonnement, mais l'origine de la rupture est la flexion [83]. Ce phénomène est visible essentiellement dans les dalles armées d'acier.

La grande ductilité observée, lors de la rupture en flexion des dalles armées d'acier, engendre de larges déformations (plastification des armatures) entraînant un deuxième mode de rupture par poinçonnement.

Les dalles ayant un faible taux d'armatures (moins de 1%), sont susceptibles d'avoir une rupture par flexion poinçonnement. [84] .Le mode de rupture par poinçonnement est fort complexe, des essais sont couramment réalisés pour mettre en évidence ce phénomène par beaucoup de chercheurs. Les principaux points inhérents au problème de rupture par poinçonnement sont actuellement établis [82].

Le poinçonnement des dalles est caractérisé par une force concentrée exercée par un poteau, c'est la réaction d'une colonne ou charge concentrée qui engendre une rupture locale par pénétration à travers la dalle (Figure I.18). Cela a pour conséquence l'effondrement d'une grande surface de la dalle [84].

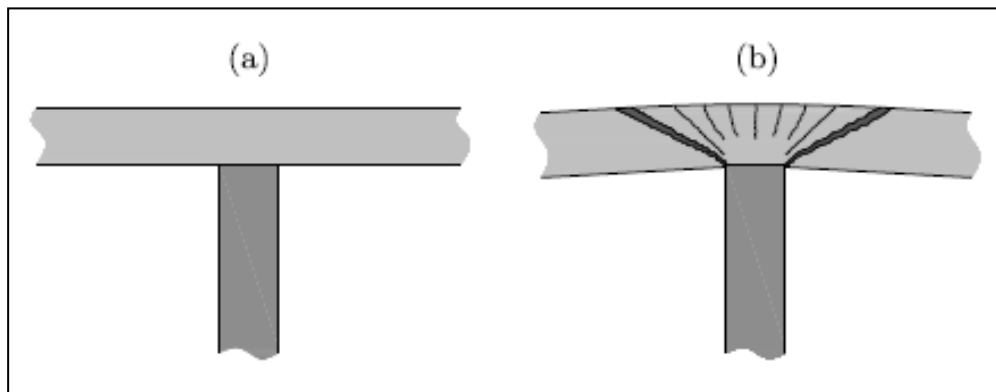


Figure. I.18 Plancher dalle : (a)avant fissurations, (b) après fissuration [84]

I.10.2. Mécanisme de rupture

Lorsque la dalle est soumise au chargement de poinçonnement, elle commence à se déformer sans que des fissures se forment. L'évolution des fissures sur la face tendue pendant la mise en charge est illustrée par la figure I.20 [87]. Des fissures tangentielles apparaissent très tôt à la face supérieure de la dalle près de la projection du périmètre de la colonne (moment de fissuration radial, Figure I.20.a). Les fissures qui suivent divisent la dalle en secteurs (Figure I.20 .b).Les moments radiaux restent limités, ainsi que les courbures dans la direction radiale, dans une zone proche de la colonne. D'autres fissures tangentielles se forment à une distance plus grande de la colonne. Par la suite, des fissures internes en forme de tronc de cône se développent, en partant des fissures tangentielles créées par les moments radiaux, en direction de la tête de la colonne (Figure. I.19).

À partir d'une certaine charge et jusqu'à la rupture, on n'observe plus de formation de nouvelles fissures, mais seulement une ouverture des fissures existantes.

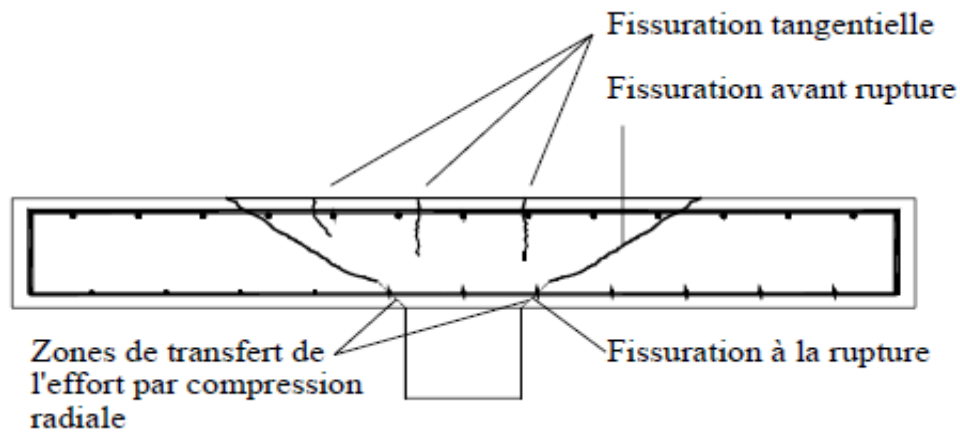


Figure I.19 Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement [87]

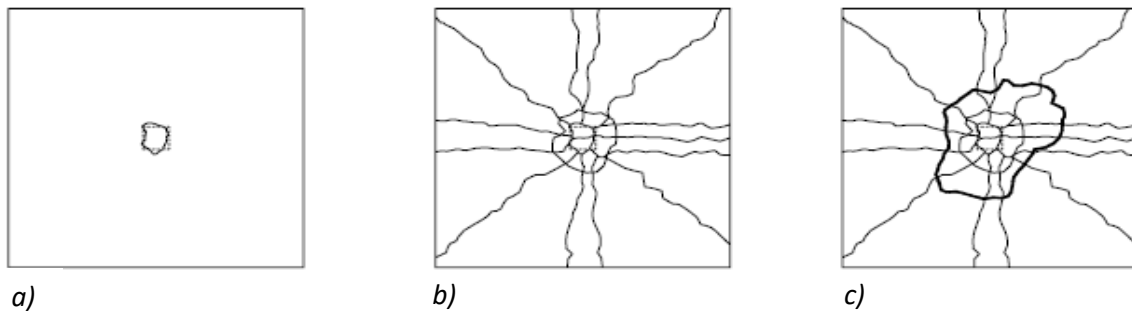


Figure I.20 Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge [87]

I.10.3. Différents types de poinçonnement

En fonction des caractéristiques géométriques des dalles et des poteaux ainsi que de la position du poteau dans la dalle on distingue trois types de poinçonnement [86] (figure I.21) :

- Poinçonnement symétrique ;
- Poinçonnement non symétrique ;
- Poinçonnement excentré.

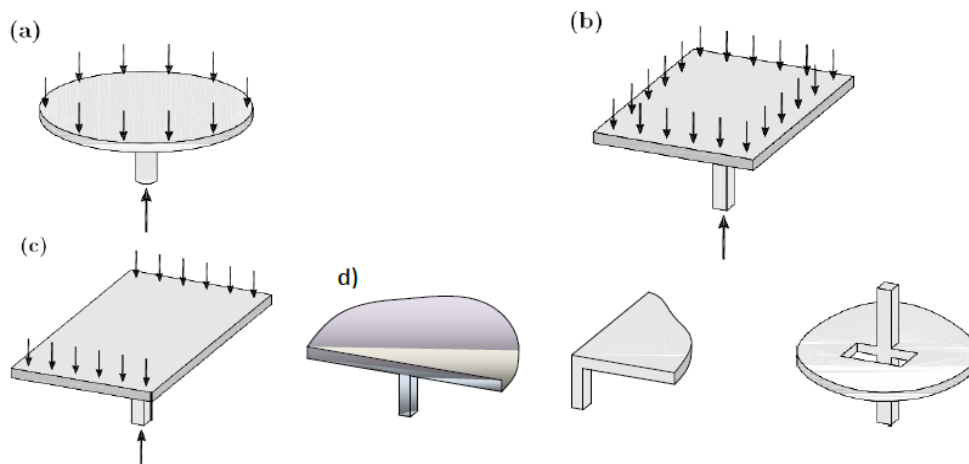


Figure I.21 Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé: (a)poinçonnement axisymétrique;(b) poinçonnement symétrique;(c)poinçonnement non symétrique; (d) poinçonnement excentré [86].

I.10.4. Comportement en flexion des dalles en béton armé

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases qu'il est important de distinguer : la Figure I.22 illustre les phases successives du comportement d'une dalle en béton armé sous une charge qui augmente progressivement [94].

a) Phase élastique linéaire

Dans cette première phase de chargement (stade I), la dalle se comporte pratiquement comme une structure dotée d'un comportement élastique linéaire.

b) Phase de fissuration

La fissuration du béton apparaît dans les zones les plus sollicitées pour s'étendre sous charge croissante aux autres zones pour lesquelles le moment de fissuration est dépassé. La rigidité des sections fissurées est réduite, ce qui conduit à une modification de la répartition des moments de flexion, les moments dans les zones non fissurées augmentent plus, pour un même accroissement de charge, que dans la phase élastique. Tant que l'écoulement de l'armature ne se produit pas, l'ouverture des fissures est limitée.

c) Phase d'écoulement

L'armature s'écoule progressivement dans les zones où les moments sont les plus élevés. Les sections où l'acier d'armature atteint sa limite d'écoulement continuent de se déformer, mais le moment de flexion n'y augmente plus, ce qui cause une redistribution des moments, plus importante que dans la phase précédente. Les zones d'écoulement de l'acier s'étendent progressivement et se concentrent le long de bandes étroites où se produisent les fissures les plus ouvertes. Ces fissures se développent suivant un schéma qui dépend notamment de la géométrie de la dalle, des conditions d'appui, de la répartition des armatures et du mode de chargement.

d) Phase de rupture

Lorsque les lignes d'articulation ont atteint un stade de développement tel que la dalle est transformée en un assemblage de sous-structures, une très légère augmentation de la charge conduit à un état d'équilibre instable provoquant l'effondrement de la dalle.

Dans le domaine élastique, selon les conditions d'appuis, on trouve différentes solutions, le plus souvent sous forme de séries de Fourier (solution de Navier pour les dalles articulées sur leurs quatre côtés, solution de Maurice Lévy pour les dalles articulées sur deux côtés opposés).

Dans le domaine post-élastique, la méthode cinématique est applicable aux dalles en partant d'un mécanisme admis a priori, c'est la théorie des lignes de rupture développées initialement par JOHANSEN [94].

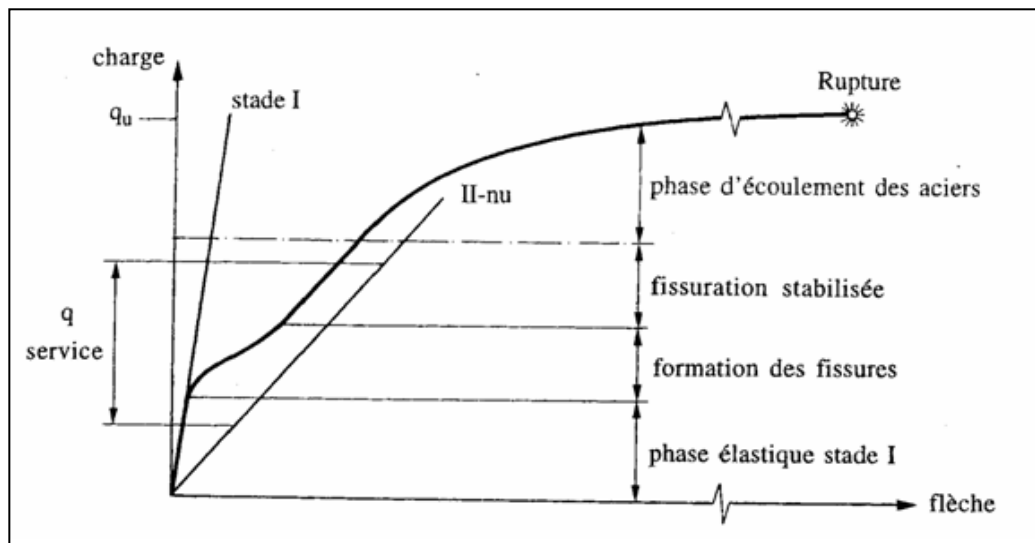


Figure. I.22 Phases successives du comportement d'une dalle en flexion [94].

I.10.5. Les avantages apportés par l'ajout de fibres métalliques sur les dalles en béton

On peut citer quelques avantages apportés par l'ajout de fibres sur les dalles en béton [88] :

- On peut remplacer l'armature transversale exigée par 0.75 % de fibres métalliques puisque ces dernières améliorent d'une façon significative la résistance en cisaillement des dalles et procurent une ductilité plus ou moins similaire ;
- La formation de la première fissure est retardée, et même si elles apparaissent ils restent toujours fins avec l'ajout de fibres ;
- L'armature de confinement pour les zones d'ancrage peut être remplacée par des fibres métalliques ;
- Une amélioration marginale de la rigidité est constatée ;
- Dans les essais de flexion trois-points, on voit une nette amélioration de la résistance post fissuration.

I.11. Revues des travaux réalisés sur le comportement en poinçonnement et à la flexion des dalles en béton fibré

Cette partie de la recherche sera réservée pour quelques revues qui ont été faites par certains auteurs sur le comportement en poinçonnement et à la flexion des dalles en béton fibré, et leurs recherches nous ont permis d’attirer des résultats intéressants.

I.11.1. Essais de flexion des dalles renforcées par deux types de fibres KHALOO et AFSHARI

Des essais de flexion ont été menés par KHALOO et AFSHARI [89] sur 28 dalles (Tableau I.4) en béton renforcé avec deux types de fibres métalliques (Tableau I.3), ils ont montré que l’ajout de fibres métalliques n’augmente pas de manière significative la résistance à la flexion des dalles en BFM sans armatures longitudinales. Cependant, il améliore l’absorption d’énergie de ces dernières, et donc la ductilité.

Concrete strength (f _c , MPa)	Fibre type	Fibre volumetric percentage	Specimen number	Number of cylindrical specimens	Number of slabs
30	-	0	1	3	2
	jc25	0.5	2	3	2
		1.0	3	3	2
		1.5	4	3	2
		0.5	5	3	2
	jc35	1.0	6	3	2
		1.5	7	3	2
45	-	0	8	3	2
	jc25	0.5	9	3	2
		1.0	10	3	2
		1.5	11	3	2
		0.5	12	3	2
	jc35	1.0	13	3	2
		1.5	14	3	2
		Total number of specimens			42

Tableau I.3 Programme expérimental [89].

Types de fibre	Type	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	L / D
extrémités en crochet	Jc25	14,66	0,35	41,9
extrémités en crochet	Jc35	18,34	0,35	52,4

Tableau I.4 Géométries et propriétés des fibres métalliques [89].

Les courbes charge flèche et absorption d’énergie flèche obtenue par KHALOO et AFSHARI [89], montrent que le pourcentage de fibres influence la capacité d’absorption d’énergie (Figures I.23, I.24 et I.25).

En effet, l’absorption d’énergie des dalles avec 0,5% de fibres métalliques est de 12 fois plus grandes que celles sans fibres et de 24 fois plus grandes avec 1%. De même, l’absorption d’énergie avec les fibres de type jc35 est plus grande qu’avec celle de types jc25.

On peut noter ici que l'augmentation de la résistance à la compression du béton améliore la capacité d'absorption d'énergie.

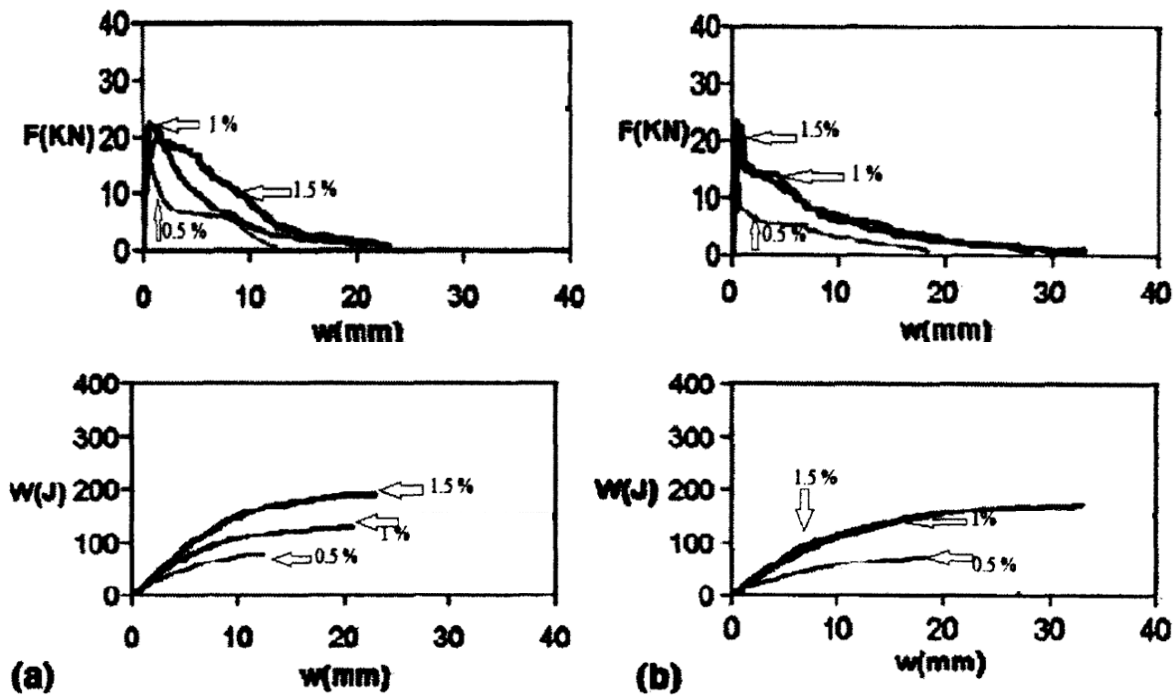


Figure I.23 Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (a) 30M Pa et jc25, (b) 30MPa et jc35 [27] métalliques [89].

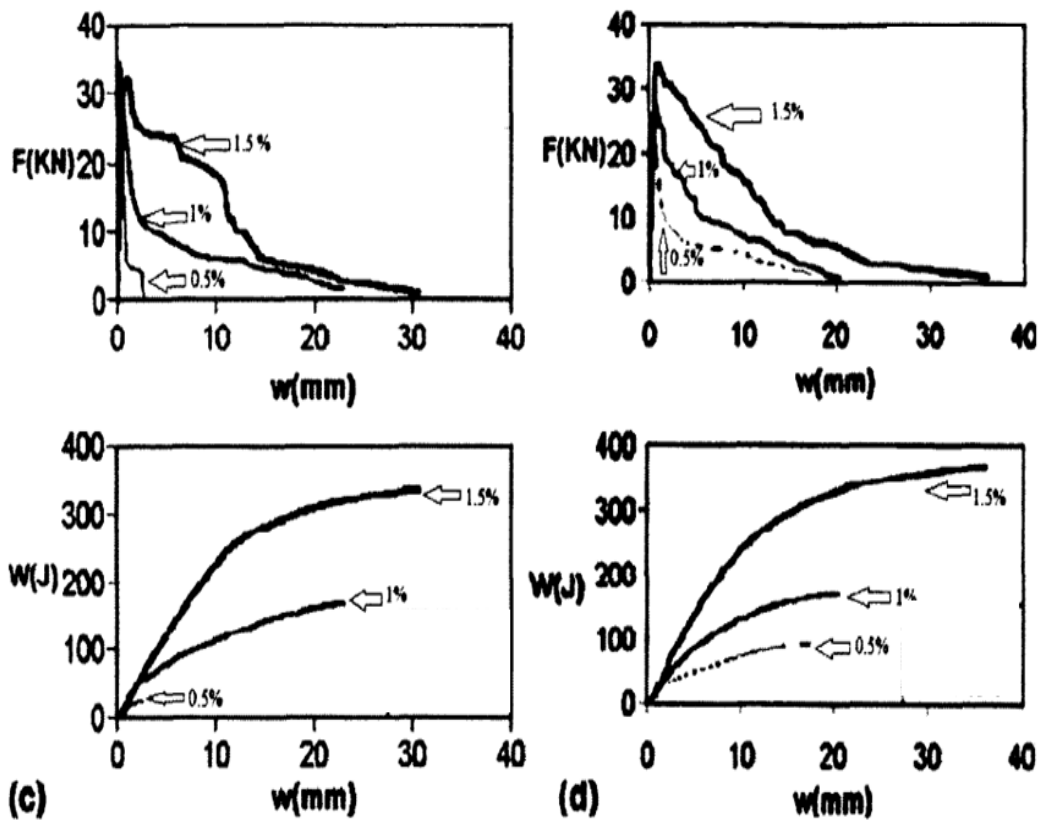


Figure I.24 Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (c) 45M Pa et jc25, (d) 45 MPa et jc35 [89].

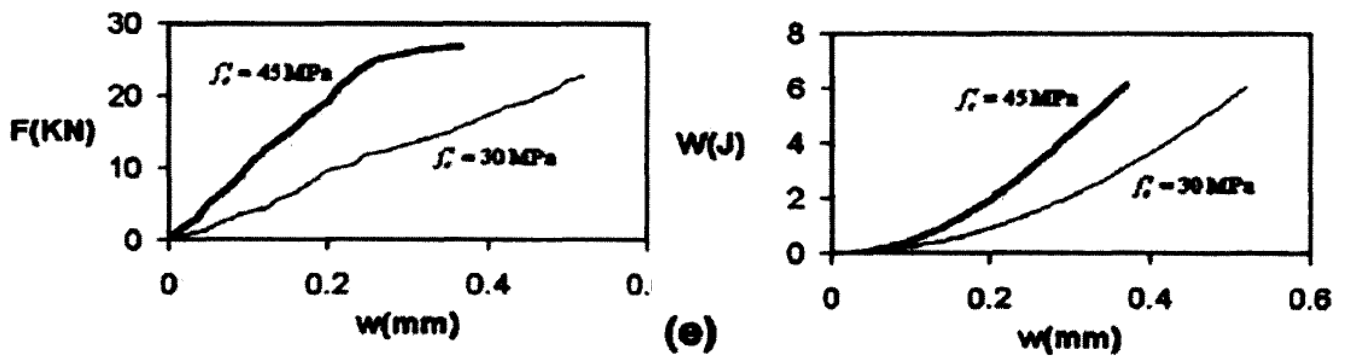


Figure I.25 Courbes charge-flèche et absorption d'énergie-flèche (e) Dalle en béton sans fibres [89].

I.11.2. Comportement en flexion des dalles avec des composites polymères renforcés de fibres de verre et des barres d'acier

Cette étude a pour but d'examiner le comportement expérimental et numérique en flexion des dalles à base de polymères renforcés de fibres de verre (GFRP), des barres d'acier et des fibres de polypropylène. 5 dalles ont été construites. Deux dalles appelées SS-1 et SS-2 ne comportent que des barres d'acier, deux dalles appelées GFRPS-1 et GFRPS-2 ne comportent que des barres composites en PRFV et une dalle appelée GFRPS-F contient à la fois des barres composites GFRP et des fibres de polypropylène. Les fibres de polypropylène sont ajoutées au béton frais pour améliorer la ductilité de la dalle.

Des essais de flexion à trois points ont été effectués sur les dalles. Toutes les dalles sont soumises à une charge monotone croissante et répartie jusqu'à l'effondrement. À l'issue des essais, les dalles GFRPS (figure I.26) ont supporté une charge supérieure de 53 % à celle des dalles SS (figure I.30). Les dalles GFRPS présentent des fissures plus nombreuses et plus larges que les autres dalles. L'ajout de 5% de fibres de polypropylène par volume au béton a contribué de manière significative à la ductilité et au comportement en traction des dalles. Le déplacement moyen de la dalle GFRPS-F est supérieur de 22,3 % à celle de la dalle GFRPS (Figure I.27) [90].

La dalle GFRPS-F a une meilleure capacité de consommation d'énergie que les autres dalles. La capacité de consommation d'énergie de la dalle GFRPS-F est 1,34 et 1,38 fois supérieure à celle des dalles SS et GFRPS, respectivement SS et des dalles GFRPS. Le nombre de fissures dans la dalle GFRPS-F est inférieur à celui des dalles GFRPS.

Les fibres ont contribué à l'aptitude au service des dalles GFRPS en limitant le déplacement et la largeur des fissures. La dalle GFRPS-F présente un comportement élastoplastique et revient presque à sa position initiale lorsque la charge est arrêtée [90].



Figure I.26 endommagement des dalles GFRPS après chargement [90].



Figure I.27 endommagement des dalles GFRPS-F après chargement [90].



Figure I.28 Endommagement des dalles SS après chargement [90].

Toutes les dalles ont été soumises à une charge distribuée croissante et monotone. Pendant l'expérience. Les relations chargent déplacement des dalles et les résultats expérimentaux sont présentés respectivement à la Figure I.29 et au Tableau I.5.

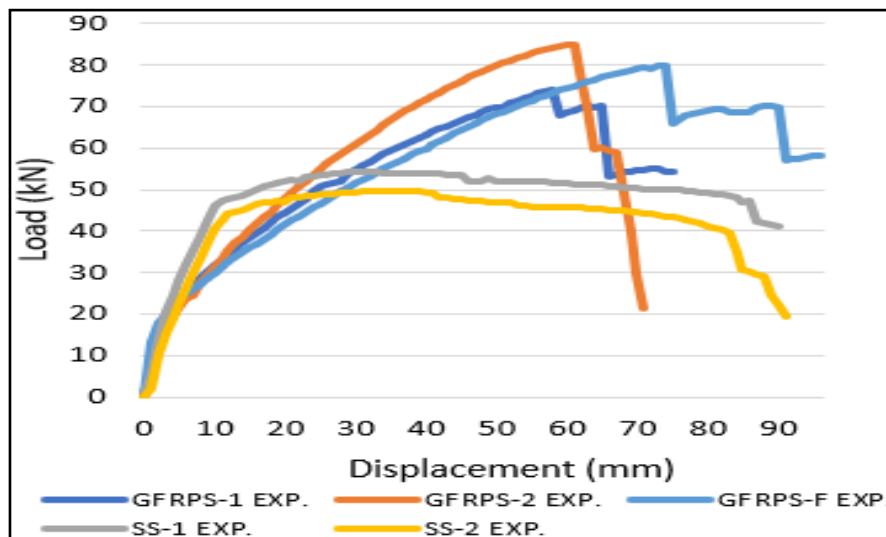


Figure I.29 Relations charge déplacement des dalles [90].

Code	Charge ultime (kN)	Charge moyenne (kN)	Déplacement Ultime (m)	Déplacement Moyen (m)	Capacité d'énergie (kN.m)	Capacité moyenne d'énergie (kN.m)
GFRPS-1	75,40	80,975	0,058	0,0605	4,03295	4,07471
GFRPS-2	86,55		0,061		4,11647	
GFRPS-F	81,50	81,50	0,074	0,074	5,60647	5,60647
SS-1	55,50	53,075	0,086	0,0845	4,43293	4,17146
SS-2	50,65		0,083		3,91000	

Tableau I. 5 Résultats expérimentaux [90].

I.11.3. Conclusion

Dans cette étude [90], le comportement en flexion de dalles avec différents renforts de traction a été étudié à la fois expérimentalement et numériquement. Des relations charge déplacement a été obtenu pour chaque dalle. Les capacités de consommation d'énergie des dalles ont été calculées à l'aide des courbes chargées déplacement obtenu à partir des résultats expérimentaux. En outre, la charge ultime, le déplacement ultime et la capacité de consommation d'énergie d'une dalle avec des fibres de polypropylène ajoutées au béton frais ont été obtenus et comparés à d'autres dalles.

Bien que les dalles GFRPS aient atteint la charge la plus élevée, les dalles SS ont atteint le déplacement le plus important, et la dalle GFRPS-F a consommé le maximum d'énergie. Les capacités de charge expérimentales des dalles sont environ 1,5 fois les charges théoriques calculées. Les capacités de charge moyennes et théoriques des dalles GFRPS sont respectivement 1,53 et 1,47 fois celles des dalles SS. On a constaté que les capacités de charge moyennes des dalles GFRPS et GFRP-F étaient à peu près égales. L'utilisation de fibres dans les dalles GFRP-F a amélioré le comportement en flexion. Le déplacement moyen

de la dalle GFRP-F a augmenté de 22,3 % par rapport à la dalle GFRPS. Cependant, le déplacement moyen de la dalle SS est supérieur de 15 % à celui de la dalle GFRPS-F. Les capacités moyennes de consommation d'énergie des dalles SS et GFRPS sont assez proches l'une de l'autre. La capacité moyenne de consommation d'énergie de la dalle GFRPS-F est supérieure de 37,6 % et de 34,4 % à celle de la dalle GFRPS et de la dalle SS, respectivement. Initialement, toutes les dalles présentaient un comportement linéaire charge-déplacement. Une réduction significative de la rigidité a été observée dans les dalles GFRPS, après la formation des fissures initiales dans les spécimens d'essai. En raison du faible module d'élasticité du matériau GFRP, les valeurs de déplacement et le nombre de fissures ont augmenté rapidement.

Les dalles GFRPS présentaient beaucoup plus de fissures que les dalles SS. Selon la dalle GFRPS, la largeur des fissures a diminué dans la dalle GFRPS-F. Le contrôle des fissures a donc été améliorée. La dalle GFRPS-F présentait un comportement presque élastoplastique. Après la mise en charge, elle est revenue à sa position presque initiale.

Selon ces résultats, les fibres de polypropylène ont contribué de manière significative au comportement en traction du béton, et la dalle GFRPS-F a montré une meilleure ductilité et une plus grande consommation d'énergie que toutes les dalles. Enfin, il n'est conclu que les barres composites en PRFV peuvent être utilisées en toute sécurité dans les bétons de chantier, les routes en béton, les murs en panneaux préfabriqués et les dalles.

I.11.4. Essais de traction par flexion trois points

Des dalles en béton considéré sans (et avec) renfort (fibres) ont subi des essais de traction par flexion trois points, ce qui reflète le cas réel du dallage industriel en béton. Dans ce travail [91], les auteurs ont voulu montrer le comportement mécanique entre les deux types de dallage, l'un est sans fibres et l'autre avec fibres, dans le but d'étudier l'effet de l'ajout des fibres dans le béton du dallage.

Pour le dallage en béton sans fibre, un treillis soudé a été employé et choisi selon le DTU 13.3. [92] Il s'agit d'un treillis soudé de maille de 15 cm avec un diamètre d'armature de 8 mm, ferrailage courant, souvent utilisé en dallage industriel dans les chantiers algériens.

Tandis que pour les dalles en béton fibré, les différentes compositions de béton de fibres métalliques retenues dans l'étude, ont fait l'objet de coulage de dalles, qui ont les mêmes dimensions que celles sans fibres métalliques retenues dans notre étude, ont fait l'objet de coulage de dalles, qui ont les mêmes

Pour réaliser l'essai de traction par flexion, on s'est inspiré aux travaux des avis techniques délivrés par le CSTB de France [93]. L'essai simule le cas d'un élément dalle soumis à un chargement linéaire, sur deux appuis simples.

Les différents résultats trouvés sont présentés dans la Figure I.30 suivante :

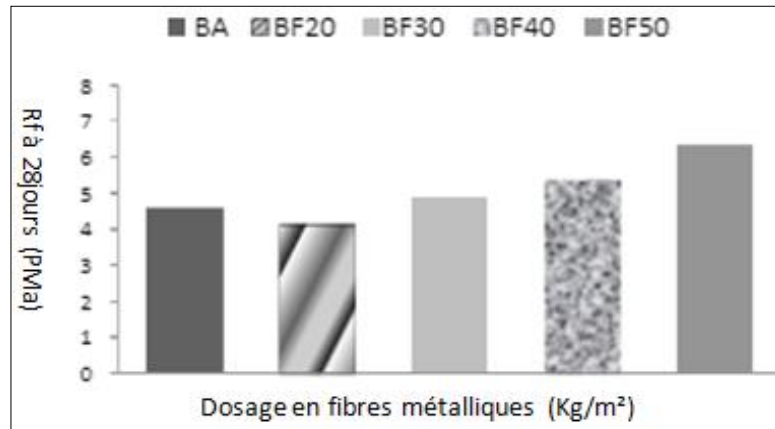


Figure I.30 Influence de la teneur en fibres sur la résistance à la traction par flexion trois points des dalles [91].

À partir des résultats trouvés, il ressort que la résistance à la traction par flexion des dalles en béton de fibres métalliques augmente proportionnellement avec le dosage en fibres, et cela, d'une manière linéaire. Aussi, il est remarqué qu'à partir du dosage en fibres de 30 kg/m³, la résistance à la traction par flexion augmente par rapport à celle du béton témoin (armé).

En termes de mode de rupture, quelle que soit la teneur en fibres, les éléments en béton fibrés ont présenté une rupture accompagnée avec l'apparition et le développement des fissures, en comparaison avec les dalles en béton sans fibres, qui ont présenté une rupture brutale (Figure I.31) [91].

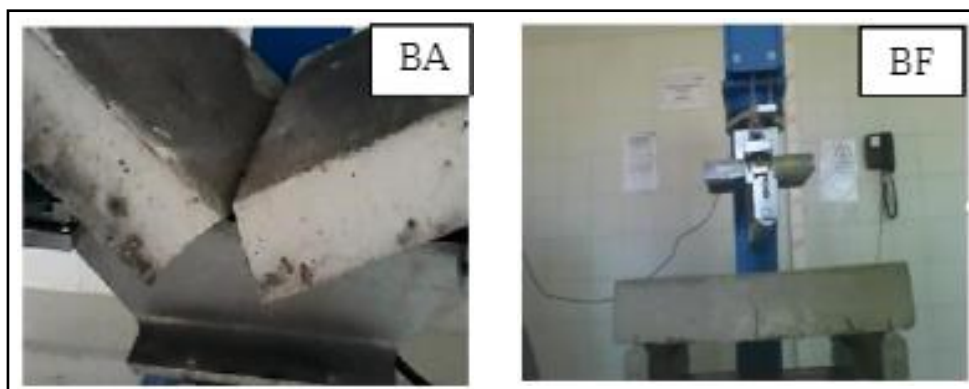


Figure I.31 Modes de rupture des dalles testées [91].

En conclusion, l'addition des fibres métalliques améliore les caractéristiques mécaniques des dalles, comparant avec celles ferrillées avec treillis soudés. À partir du dosage de 30

kg/m³ de fibres, cette résistance des dalles en BFM est supérieure à celle des dalles avec du béton sans fibres, ainsi qu'une transformation du mode de rupture de la fragilité brutale vers un comportement ductile, en améliorant la ténacité du matériau composite. Cette constatation a été obtenue avec tous les dosages en fibres, y compris le dosage le plus faible (20Kg/ m³) [91].

I.11.5. Comportement d'une dalle renforcée par matériaux composites sous chargement centré

L'objectif de cette étude est d'observer le comportement d'une dalle renforcée par matériaux composites sous chargement centré. Huit dalles ont été fabriquées dont six renforcées, une première série des essais a servi de comparaison entre le comportement des dalles renforcées et non renforcées, ainsi que l'évaluation de l'effet du taux de renforcement sur le comportement des dalles renforcées. Le Tableau I.6 résume les caractéristiques des dalles. Lors de l'essai, la dalle est retournée telle que la face renforcée se trouve en position supérieure et simplement appuyée.

L'objectif de la thèse a porté sur l'évaluation du gain en rigidité et en résistance de dalles renforcées par matériaux composites. Les essais menés sur les dalles simplement appuyées renforcées et non renforcées ont clairement mis en évidence l'influence du composite en particulier sur la charge ultime.

Deux bandes composites à faible grammage en fibres de 30cm de largeur sont collées dans les deux directions (Figure I.32). Pour le renforcement interne, le treillis soudé d'armature a été placé à mi-hauteur de la dalle, ces deux mesures visent à réduire la capacité flexionnelle de la dalle [94].

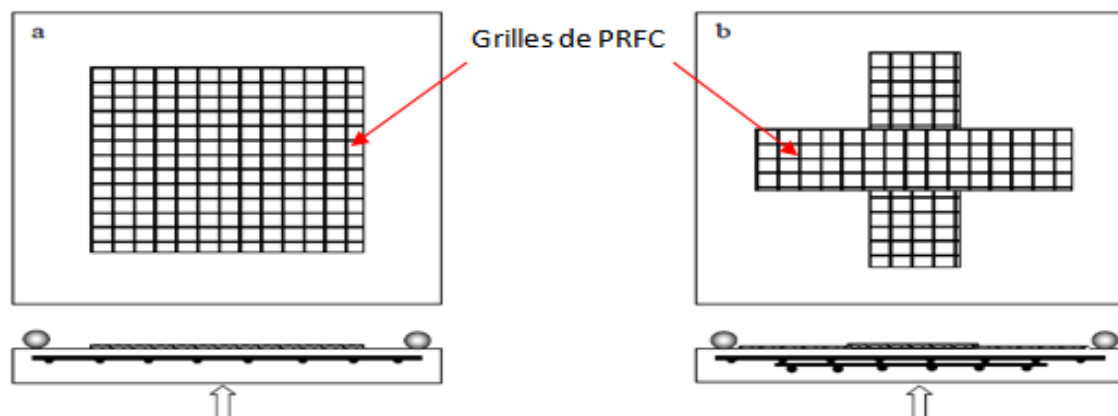


Figure I.32 Schémas de renforcement des dalles [94].

Pour augmenter la résistance au poinçonnement, une deuxième mesure concerne l’ancrage de mèches en fibres de carbone dans l’extrémité de la dalle, afin de réduire les risques de rupture prématurée par décollement du composite.

dalle	Armatures(%)	Composite	
		Surface(%)	Epaisseur(%)
D11	0,12	-	-
D12	0,33	-	-
D13	0,12	65	1
D14	0,12	65	1,6
D15	0,12	65	2,0
D16	0,12	38	0,8
D17	0,33	38	1,2
D18	0,33	38	1

Tableau I.6 Caractéristiques du renforcement des dalles testées [94].

L’analyse des modes de rupture obtenus a confirmé que la ruine de la structure se produit essentiellement par poinçonnement local. Les essais menés sur les dalles renforcées et non renforcées ont clairement mis en évidence l’influence du composite, en particulier sur la charge ultime (Figure I.33). Les relations moment-courbure sont peu modifiées en phase élastique, par contre les moments ultimes peuvent être 4 à 5 fois supérieurs. Les déplacements verticaux d’un élément de plaque renforcée par matériaux composites sont particulièrement sensibles à l’épaisseur du renfort appliqué et à son module et peuvent être minimisés de 20%.

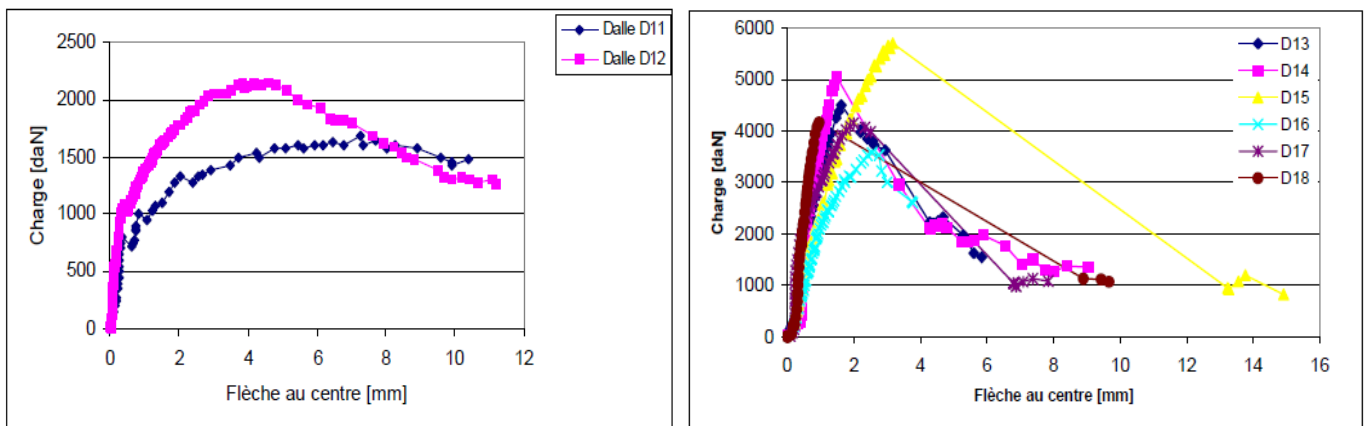


Figure I.33 Courbes charge flèche de la même dalle avec et sans renforcement [94].

Nombre de spécimens	18
Dimensions	0,56 m x 0,56 M
Epaisseur	50mm
Type de renforcement	-Grille de PRFC -Acier
Taux de renforcement	0,12 % - 0,33 %pour l’acier 0,38- 0,65% pour le composite
F _{c28}	25 Mpa

Tableau I.7 Caractéristiques des spécimens testés [94].

I.11.6. Etude des dallettes en béton de fibres métalliques à base de matériaux locaux

Une partie de ce travail a consisté à l'étude de l'effet des fibres sur le comportement des dalles en béton armé. Deux types de fibres ont été utilisés : fibres longues (50mm) et fibres courtes (35mm). La partie structure a consisté dans l'étude de l'effet des fibres sur la rigidité à la flexion des dalles en béton armé. Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'amélioration aussi bien des caractéristiques mécaniques (indiquées ci-dessus) du béton ainsi que la rigidité à la flexion [95].

a) Propriétés mécaniques des BFM

Un programme expérimental a été mis au point afin de quantifier l'apport des fibres. Les objectifs fixés et de caractérisation des matériaux.

- Trois dalles en béton sont coulées sur sol de dimensions 180 x 180 x 10cm. Le premier est en béton les deux autres en béton de fibres (fibres longues, fibres courtes) chacune est divisée en neuf dallettes de 60 x 60 x 10cm ;
- Trois dalles de dimensions 110 x 110 x 6cm.

Pour le comportement en compression, six éprouvettes 16x32cm ont été testées en compression (pour les quatre types de bétons traités). Pour chaque éprouvette, nous avons déterminé la résistance à la compression et le module de Young. Les résultats sont regroupés dans le Tableau I.8.

Essais	BT	BFC	BFL	BFC + L
Résistance f_{c28} (Mpa)	48,2	53,8	53,2	58,9
Module E (MPa)	33025	46275	45862	49000

Tableau I.8 Résultats des essais de compression et valeurs du module de Young des BFM [95].

Ces paramètres montrent une légère amélioration de la ductilité et des résistances à la compression. L'amélioration du module de Young peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges [96].

b) Comportement en traction

Six éprouvettes 7 x 7 x 28cm³ ont été testées en traction par flexion. Pour chaque éprouvette, nous avons déterminé la résistance à la traction par flexion. Les fibres contribuent à une augmentation importante de la résistance à la traction. Mais en réalité l'essai le mieux adapté à l'obtention d'une loi de comportement utilisable pour les calculs d'éléments de structure est l'essai de traction directe (uni axial) [97]. Deux solutions sont donc utilisées: entailler les éprouvettes dans la section médiane [98], ou fabriquer des éprouvettes de section variable

avec une zone centrale réduite [99] et [100]. L'éprouvette représentée sur la Figure I.34 montre l'importance de sa géométrie dans l'étude du comportement en traction directe.



Figure I.34 Eprouvette testée en traction directe (photo de l'éprouvette et photo de l'essai) [95].

La Figure I.35 représente la courbe moyenne des mesures de la résistance à la traction directe pour trois types de Béton étudiés. Nous en déduisons une augmentation de la résistance à la traction directe du matériau.

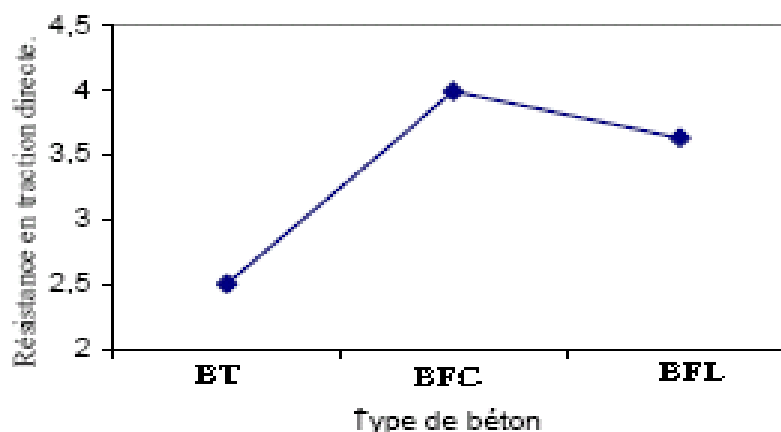


Figure I.35 Evolution de la contrainte de traction (MPa) suivant le type du béton [95].

c) Eléments de structure fonctionnant comme des dalles

➤ Géométrie de l'essai

Nous avons confectionné des 27 dallettes de 60x60x10cm pour réaliser les essais : Essai de poinçonnement-Flexion (Quatre appuis), essai de poinçonnement-Flexion (Deux appuis), essai de Flexion trois points et trois dallettes 110x110x6cm pour la réalisation de l'essai de flexion avec une charge uniformément répartissent encastres en quatre appuis [95].

➤ Résultats des essais sur dallettes

• Essais de flexion trois points

La Figure I.36 présente la courbe force – déplacement au centre de la dallette (moyenne de deux dallettes). Après la rupture du béton la dallette reste chargée. Les fibres apportent, pour

ce type de sollicitation des endommagements ductilités. On remarque que les fibres longues résistent plus dans le temps plus que les fibres courtes.

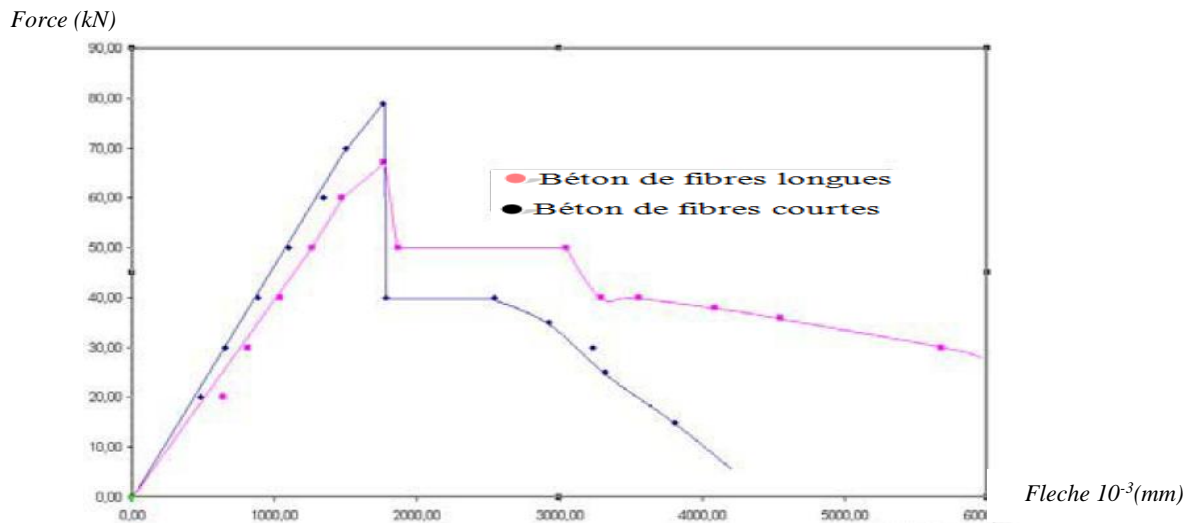


Figure I.36 Courbe force – déplacement au centre de la dalle (moyenne de deux dalles) [95].

La Figure I.36 présente la courbe force – déplacement au centre de la dalle (moyenne de trois dalles). Après la rupture du béton, on a chargé la dalle de nouveau. Les fibres apportent, pour ce type de sollicitation la possibilité de charger la dalle de nouveau. Avec une charge supérieure à 50% de la charge de la rupture. On remarque que les fibres courtes peuvent résister pour des charges légèrement supérieures à celles des fibres longues, tandis que ces dernières résistent plus dans le temps que les fibres courtes.

La figure I.37 présente la courbe force – ouverture de la fissure au centre de la dalle (moyenne de trois dalles). On remarque que les fibres courtes peuvent résister pour des charges plus grandes que les fibres longues vis-à-vis de la fissuration (apparition de la première fissure) tandis que les fibres longues résistent dans le temps plus, même avec des ouvertures des fissures plus grandes que les fibres courtes.

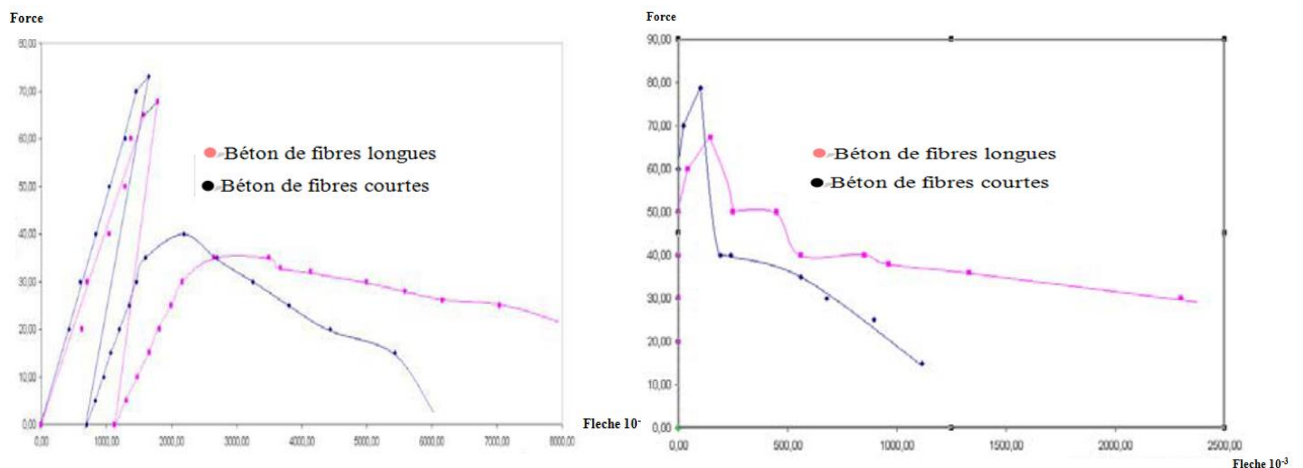


Figure I.37 et I.38 Courbe force – déplacement au centre de la dalle (moyenne de deux dalles) [95].

- **Essais de poinçonnement – flexion sur dalle : (Deux appuis)**

Neuf dalles (trois sans fibres, trois avec fibres courtes et trois avec fibres longues) ont été étudiées au poinçonnement sur deux appuis. Les fibres contribuent, pour ces types de sollicitation, de la même manière que pour l'essai de flexion trois points avec des pourcentages différents.

- **Essais de poinçonnement – flexion sur dalle : (Quatre appuis).**

Trois dalles ont été étudiées au poinçonnement à quatre appuis. Les fibres apportent en plus, pour ces types de sollicitation une augmentation remarquable de la résistance.

- **Ligne de rupture**

Pour les essais de flexion trois points sur dalle la ligne de rupture est au milieu de la dalle (Figure I.39).



Figure I.39 Ligne de rupture est au milieu de la dalle [95].

Pour les essais de poinçonnement (flexion deux appuis sur dalle), la ligne de rupture est inclinée par rapport au milieu de la dalle à un angle inférieure à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et au milieu pour les dalles sans fibre (Figure I.40).



Figure I.40 La ligne de rupture est inclinée par rapport au milieu de la dalle à un angle inférieur à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et au milieu pour les dalles sans fibres [95].

Pour les essais de poinçonnement (flexion quatre appuis sur dalle), deux lignes de rupture perpendiculaires et inclinées par rapport au milieu de la dalle à un angle inférieur à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et deux lignes de rupture perpendiculaires au milieu pour les dalles sans fibres (Figure I.41).



Figure I.41 Deux lignes de rupture perpendiculaires et inclinées par rapport au milieu de la dalle à un angle inférieur à 45° pour les dalles en béton de fibres métalliques et deux lignes de rupture perpendiculaires au milieu pour les dalles sans fibres [95].

- Essai de flexion avec une charge uniformément répartit encastré sur quatre appuis



Figure I.42 Dispositif métallique en quatre appuis [95].

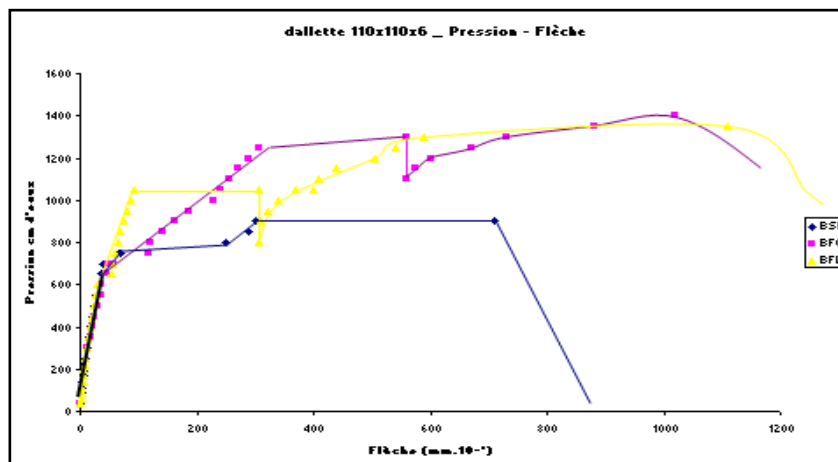


Figure I.43 Courbe pression-fleche d'une charge uniformément répartit encastré sur quatre appuis. [91].

En conclusion de cette partie de recherche, les auteurs ont étudié l'influence des fibres sur des dalles en béton. On résulte que les fibres courtes peuvent réduire la hauteur de la dalle de 16%, peuvent aussi supporter une charge supplémentaire de 28,8% et augmentent la longueur critique de chargement de 8% par rapport au béton sans fibres. Les fibres longues peuvent réduire la hauteur de la dalle de 10,7%, peuvent aussi supporter une charge supplémentaire de 20% et augmentent la longueur critique de chargement de 7,75% par rapport au béton sans fibres.

I.11.7. Influence du type de fibre sur le comportement en flexion des dalles

La combinaison de fibres avec des mélanges de bétons est devenue essentielle et son utilisation généralisée améliore la résistance des éléments structuraux. Et cette recherche a mené une expérience sur la performance structurale de dalles plates avec et sans ouverture carrée en utilisant quatre types de fibres (à crochets, droites, en acier ondulé et en polyoléfine) afin de mieux comprendre la façon dont les fibres peuvent être combinées, (droite, fibre d'acier ondulée et fibre de polyoléfine) et de comprendre comment la variance du type et de la

forme de la fibre affecte la flexion de la dalle et le comportement en flexion des dalles bidirectionnelles.

La partie a souligné dans cette étude basée sur le comportement en flexion des dalles à double sens.

En considérant dix dalles ont été divisés en cinq paires, dont deux spécimens utilisés comme spécimens de référence (avec et sans ouvertures), huit autres spécimens utilisés comme spécimens de référence (avec et sans ouvertures), et huit autres spécimens avec différents types de fibres.

Les propriétés des polyoléfines et des fibres d'acier sont répertoriées dans le Tableau I.9 [101]. La Figure I.44 montre le type et la forme des fibres d'acier et de polyoléfine.

Type de fibre	Forme	L : Longueur (mm)	D : Diamètre (mm)	Rapport L/D	Résistance à la traction (MPa)
Fibre d'acier droite	droite	12	0,25	48	2850
Fibre d'acier crochetée	crochetée	30	0,5	60	>1000
Fibre d'acier ondulé	Ondulée	30	0,55	55	>700
Polyoléfine fiber	/	60	0,84	71	465

Tableau I. 9 Propriétés des fibres utilisées [101].

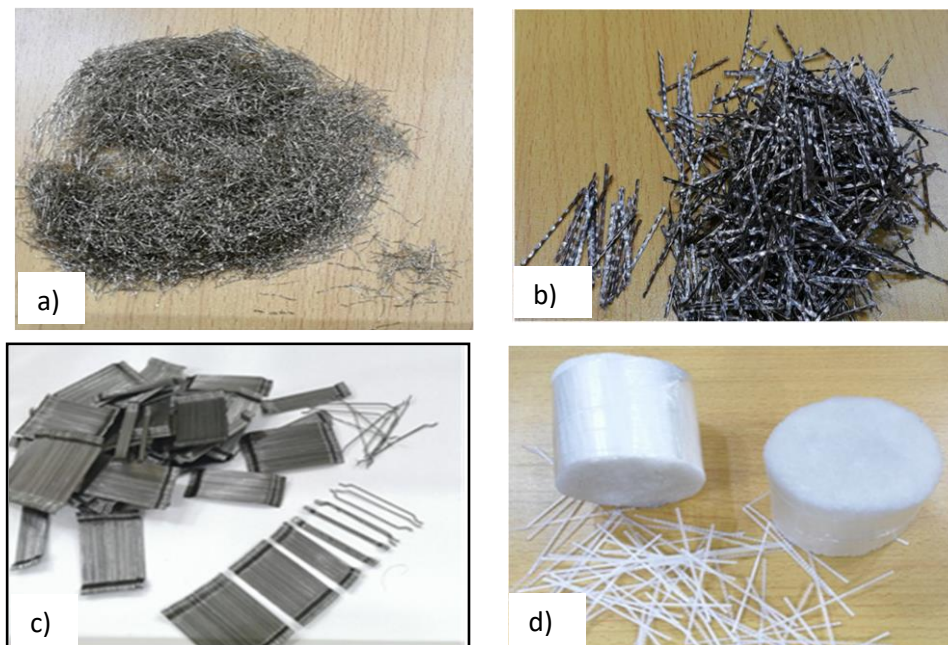


Figure I. 44 Types de fibres : a) Fibres d'acier droites ; b) Fibre d'acier ondulée ; c) Fibre d'acier crochetée et d) Fibre de polyoléfine [101].

Les dimensions des dalles bidirectionnelles étaient de $800 \times 800 \times 100 \text{ mm}^3$. Ils ont été armés avec T12mm dans les deux sens (5 barres dans chaque sens) avec revêtement en béton 25mm, la limite d'élasticité de la barre d'acier utilisée était de 428MPa avec une contrainte ultime F_u égale à 543MPa et la limite d'élasticité était de (0,00226). La dalle était soutenue par un cadre en acier ($700 \times 700 \text{ mm}$) offrant une portée libre de 700mm dans deux directions. La Figure I.45 détaille la géométrie et l'armature de l'échantillon de dalle. La dalle comportait une ouverture ($150 \times 150 \text{ mm}$) au centre du panneau et les charges ont été appliquées sur une plaque d'acier de dimensions $200 \times 200 \text{ mm}$ au centre.

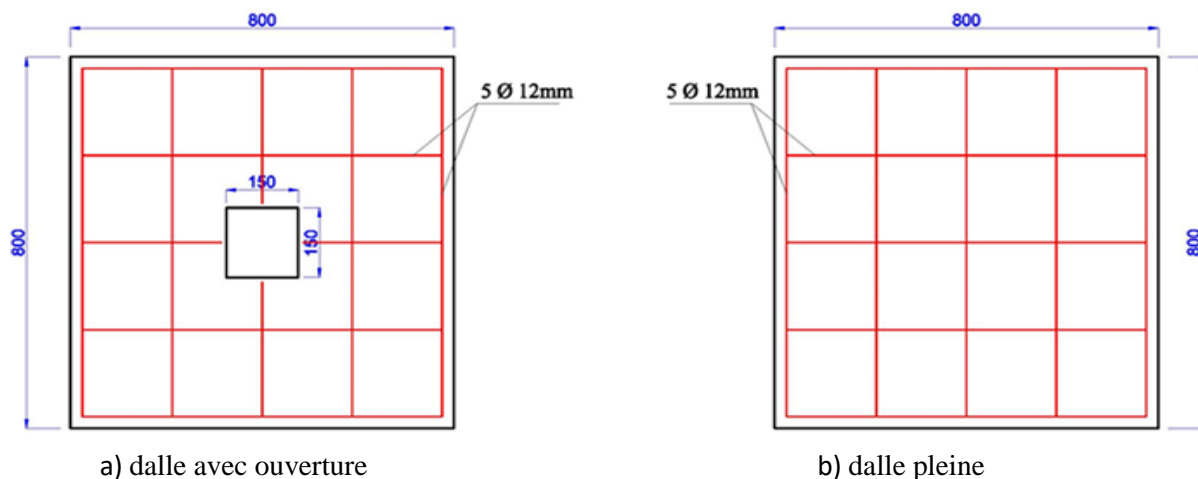


Figure I. 45 Détails des dalles renforcées à double sens

a) dalle avec ouverture et b) dalle pleine [101].

En général, les fibres d'acier dans le béton produisent une amélioration modérée de la résistance à la compression.

Les fibres utilisées dans les mélanges du béton ont augmenté la résistance à la compression d'environ 24,8%, 20%, 22% et 11,3% pour les fibres droites, crochetées, ondulées et polyoléfiniques, respectivement, par rapport aux échantillons de contrôle. Les fibres ont augmenté l'absorption d'énergie et amélioré la ductilité et la fibre d'acier a produit une résistance à la compression plus élevée, elle peut mieux empêcher les microfissures de se produire (Figure I. 48.a).

Le Tableau I.10 et la Figure I.48.b présentent le module de rupture, on constate une amélioration remarquable de la capacité de flexion du prisme renforcé par des fibres, et que cette amélioration est plus importante que celle des autres propriétés. Des augmentations d'environ 109%, 78% et 62% de l'acier croché, l'acier ondulé, et de fibre de polyoléfine, respectivement. Initialement, la fibre améliore la ténacité ou la capacité d'absorption d'énergie. L'adhérence et la friction plus élevées entre la fibre et la matrice de béton

conduisent à des améliorations de la résistance à la flexion surtout avec les fibres d'acier à bouts crochus et ondulés. Le taux d'incrémentation le plus élevé de la résistance à la traction par fendage était de 94% et de 77% pour les fibres d'acier crochetées et ondulées, respectivement, par rapport au béton ordinaire, comme le montre la Figure I .48c.

Type d'échantillon	Symboles	Compression Essai sur cylindre (MPa)	Module de rupture (MPa)	Résistance à la traction par fendage (MPa)
Sans fibre (contrôle)	contrôle	36,2	4,20	2,32
Fibre d'acier droite 12 mm	S-1	45,2	6,38	3,81
Fibre d'acier crochetée 30 mm	H-1	43,50	8,76	4,51
Fibre d'acier ondulée 30 mm	C-1	44,20	7,49	4,12
Fibre de polyoléfine 60 mm	P-1	40,30	6,80	3,12

Tableau I. 10 Résultats des essais de propriétés mécaniques des mélanges [101].

a) Modes de défaillance et modèles de fissures

Les fissures diagonales sur la surface inférieure partent des coins de l'ouverture et se propagent du centre vers les coins de la dalle, et toutes les éprouvettes se sont rompues en flexion. Sur les éprouvettes de contrôle avec ouverture, les fissures se sont largement propagées et ont été accompagnées d'une fissure mineure, étroite et courte en plus de la fissure principale sur l'ensemble de la dalle. Dans les autres spécimens avec fibre d'acier, moins de fissures ont été générés des coins de l'ouverture vers le coin de la dalle, ce qui indique une plus grande augmentation de la rigidité de la dalle et a conduit à une charge ultime plus élevée par rapport à l'échantillon de contrôle. La dalle avec polyoléfine a montré un comportement plus ductile et la fissure s'est dévolue beaucoup plus que celles dans les spécimens de contrôle avec ouverture.

Les fissures ont augmenté progressivement jusqu'à ce qu'une légère réduction de la rigidité soit observée et que la largeur des fissures augmente. À ce stade, l'énergie a été légèrement absorbée et la déformation plastique a commencé à apparaître à la capacité de charge ultime de la dalle, plus aucune fissure ne s'est formée et les modes de défaillance finaux étaient similaires dans tous les cas. Le principal mode de défaillance était la flexion car l'armature principale de la dalle a été choisie pour éviter le cisaillement par poinçonnement.

Les charges de fissuration pour les dalles pleines avec fibres ont augmenté d'environ 43%, 27% et 33% pour les fibres d'acier à crochets, d'acier ondulé et de polyoléfine, respectivement, tandis que pour les dalles avec ouverture, les augmentations des charges de fissuration étaient de 10%, 42% et 25%, respectivement.

La Figure I.46 montre la charge de la première fissure pour les dalles sans ouverture et il est clair que l'échantillon avec la polyoléfine a montré des fissures extra-fines par rapport aux échantillons avec l'acier [101].

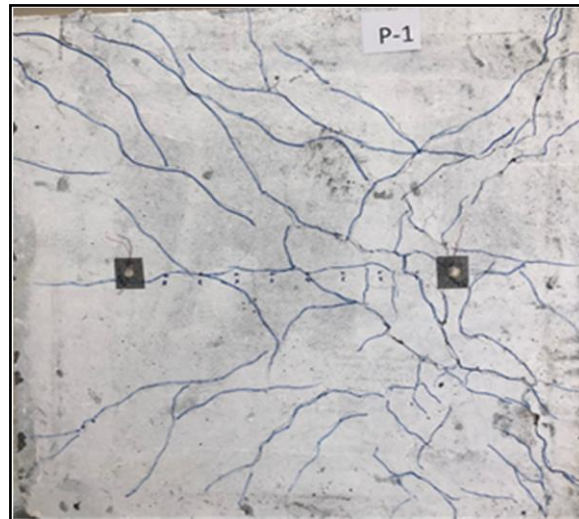


Figure I. 46 Fissures et modèle de déformations pour une dalle pleine avec fibres polyoléfines [101].

b) Effet du type de fibre sur la charge de fissuration

L'effet du type de fibres sur la charge de fissuration est illustré sur la Figure I.47 suivante :

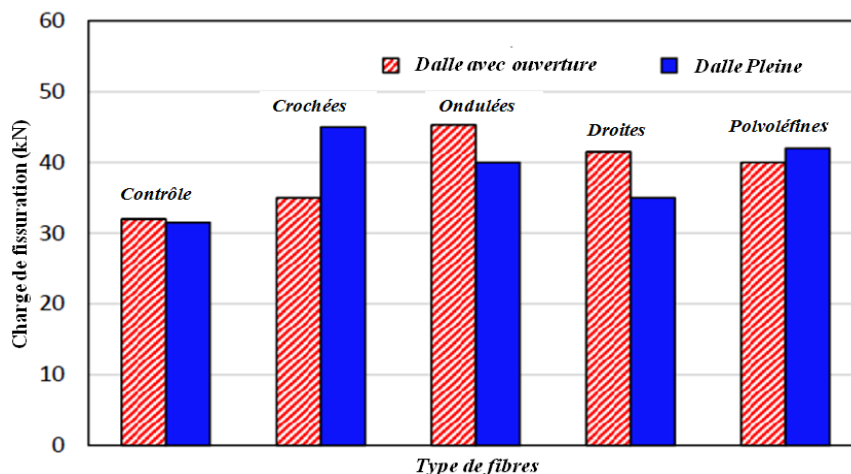


Figure I. 47 Effet du type de fibre sur la charge de fissuration [101].

c) Résultats de la charge et de la flexion

Les courbes charge-déformation de tous les échantillons de dalles bidirectionnelles testés est illustrée à la Figure I.48.

Toutes les valeurs de déflexion des dalles ont été mesurées au centre de la dalle. En général, les courbes charge-déflexion commencent par un comportement linéaire comme un stade élastique sans fissures, suivi d'une partie non linéaire de la courbe avec un comportement de fissuration élastique. On peut constater que la déflexion enregistrée pour les échantillons mélangés avec des fibres est inférieure à celle des échantillons de dalles de contrôle, ce qui indique que la structure de la dalle a absorbé la déformation.

L'utilisation de fibres dans les mélanges du béton améliore la ductilité et la rigidité, mais cela doit se faire dans une proportion limitée de volume de fibres, car les augmentations de la charge ultime sont plus faibles au-delà d'une certaine proportion de volume de fibres en raison de la fragilisation du matériau.

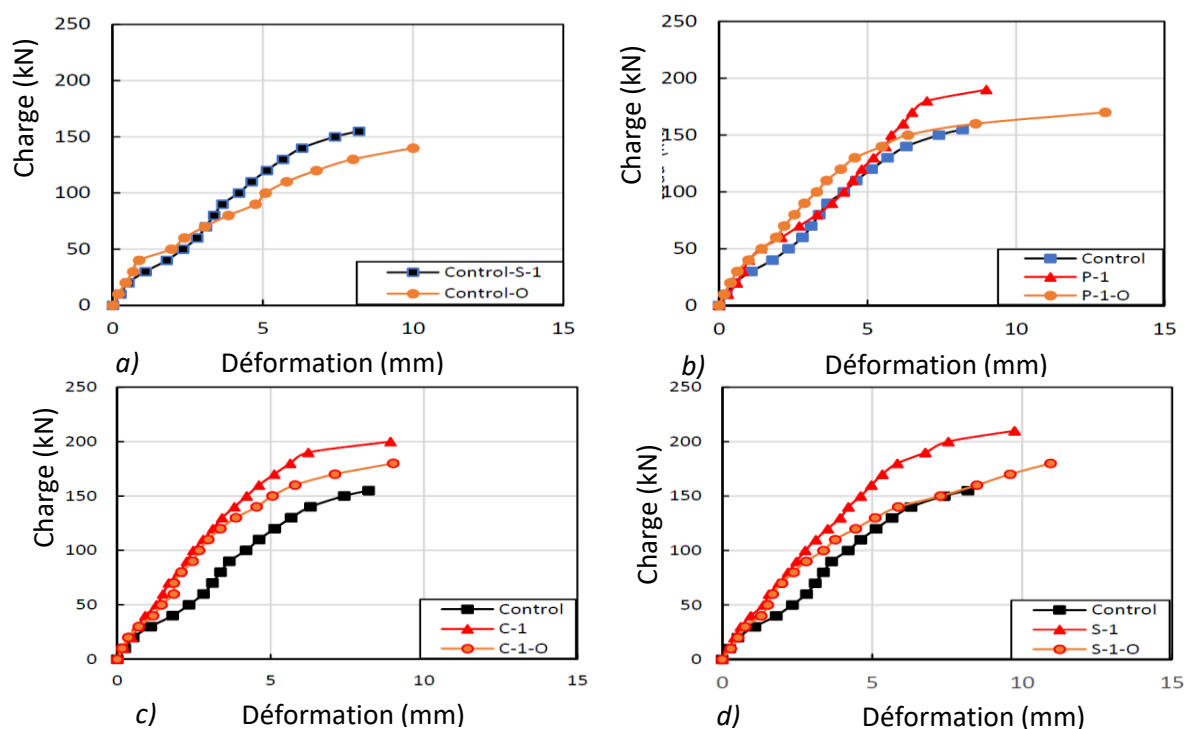


Figure I. 48 Charge-Déformation des dalles avec différents types de fibres,
 a) dalle de contrôle avec et sans ouverture ; b) Dalle avec fibre polyoléfine ;
 c) Dalle avec fibre d'acier ondulée et d) Dalle avec fibre d'acier droite [101].

I.11.8. Conclusion

L'effet du type de fibre sur les propriétés mécaniques du béton et le comportement en flexion des dalles bidirectionnelles en béton armé (avec et sans ouvertures) a été étudié dans cette étude [101] et les résultats peuvent être résumés :

- La résistance à la compression du béton modifié avec des fibres a montré que l'échantillon avec des fibres d'acier avait une meilleure résistance à la compression. Les fibres d'acier ondulées et crochetées ont montré une amélioration plus importante

que les autres types de fibres. Les fibres de polyoléfine ont légèrement augmenté la résistance à la compression par rapport aux échantillons de contrôle ;

- L'ajout de fibres a eu un léger effet d'amélioration sur la résistance à la compression, variant entre 11,3% et 24,8% ;
- Les résultats des essais de résistance à la traction par fendage suggèrent une bonne amélioration pour tous les spécimens utilisant différents types de fibres dans les mélanges du béton. Les fibres d'acier crochetées et ondulées ont montré les améliorations les plus importantes (94% et 77%) par rapport à une éprouvette ordinaire de contrôle. Les fibres polyoléfines ont montré moins d'amélioration que les fibres d'acier ;
- La fibre d'acier crochetée a donné la meilleure performance des types de fibres en améliorant le module de rupture, où le ratio d'augmentation était de 109% par rapport à l'échantillon de contrôle, tandis que l'amélioration de la fibre de polyoléfine était d'environ 62%. En général, l'amélioration a été supérieure au niveau du module de rupture ;
- L'effet de la forme des fibres avec un dosage constant de fibres d'acier sur le comportement en flexion et les propriétés mécaniques testées montre que les fibres d'acier en crochet ont produit la plus grande amélioration ;
- Il a été conclu que la charge de fissuration augmentait pour tous les échantillons avec fibres et que l'amélioration la plus importante se produisait pour le béton armé combiné avec fibre crochetée (43%) pour une dalle solide comparée à une dalle de référence. Une augmentation modérée de la charge de fissuration a été obtenue en utilisant des fibres de polyoléfine (19%). Il a été remarqué que le comportement en flexion des dalles bidirectionnelles avec fibres semble plus ductile ;
- Les dalles avec ouvertures ont présenté de bonnes améliorations au niveau de la fissuration et de la charge ultime tout en développant des déflexions plus importantes que les dalles pleines ;
- Toutes les éprouvettes se sont rompues en mode flexion en raison de l'interaction des fibres avec le béton et cette combinaison a réduit la faiblesse du comportement en flexion, en particulier dans les dalles avec une ouverture. De plus, l'amélioration du comportement en flexion était bonne par rapport aux spécimens de contrôle en raison de la ductilité améliorée et des retards dans la progression des fissures ;

- Généralement, les fibres augmentent plus efficacement la liaison entre les matrices de béton par friction et interaction mécanique, il est donc préférable d'utiliser des fibres d'acier crochetées ou ondulées pour l'amélioration de la flexion.

I.11.9. Comportement des dalles en béton renforcé par différents Matériaux géosynthétiques

L'objectif de cette recherche est d'analyser le comportement structurel pour les échantillons de dalles de béton à résistance normale soumis à une charge monotone. Le programme expérimental se compose de six dalles simplement supportées renforcées avec différents types de renforts. La réponse structurelle de chacun est comparée à celle d'un échantillon de béton ordinaire pour quantifier les avantages tirés de ce renforcement. Les aspects du comportement évalué comprennent la capacité de charge maximale, le déplacement, la contrainte, la résistance à la flexion, le comportement de dissipation d'énergie, le motif de fissuration et le mécanisme de défaillance.

Les matériaux de renforcement en béton utilisés dans cette recherche étaient des barres d'acier, des géogrilles biaxiales et des fibres de polypropylène [102]. Le diamètre de la barre d'acier était de 10mm. Trois types différents de géogrilles biaxiales sont présentés dans la Figure I.49, (a) Geocell (GG-9), (b) Type de géo réseau biaxial Tenax (LB0-440) et (c) Geogrid biaxial, type Secugrid. De plus, le type de fibre de polypropylène de 13 micromètre de diamètre et de 15mm de longueur a été utilisé comme renfort pour les dalles de béton, comme le montre la Figure I.50.

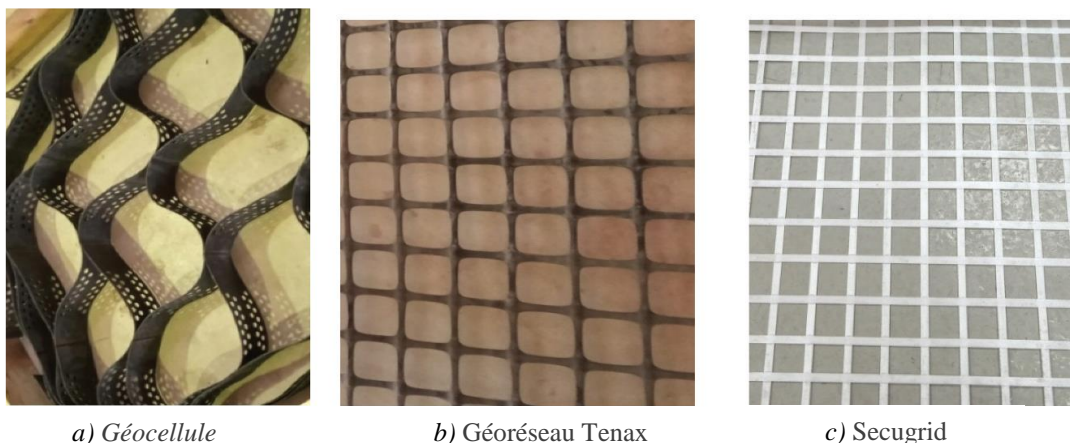


Figure I.49 Types de géogrilles utilisés [102].



Figure. I.50 Type de fibre de polypropylène [102].

La Figure I.51 montre les types de géogridle pendant le processus d’essai en utilisant la méthode de traction multi-nervure. On peut remarquer qu’il existe des variations dans la géométrie de l’ouverture, les dimensions et les propriétés physiques entre les trois types de géogridles. La résistance à la traction ultime pour chaque type de géogridle a été obtenue expérimentalement en utilisant la machine UTM.

Cette stratégie d’essai comprend la détermination de la résistance à la traction des géogridles en soumettant des bandes de largeur variable à une charge de traction, comme le montre la Figure I.52. La dose de fibres de polypropylène était de 3% en poids de la teneur en ciment.



Figure. I.51 Essai Geogrid en utilisant la méthode de traction multi-nervure [102].

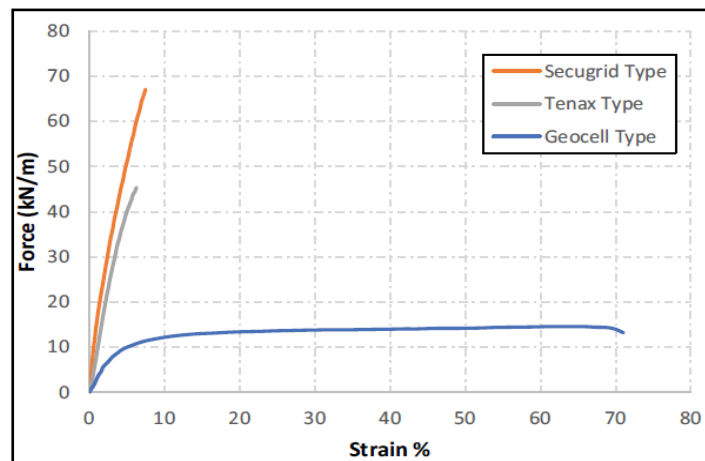
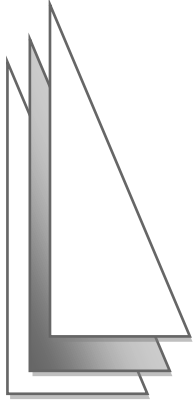


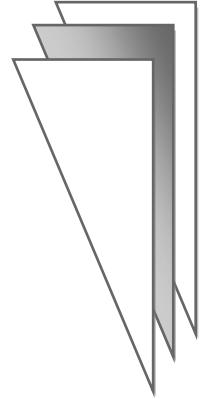
Figure I.52 Force-Contrainte pour trois types de géogridle testés [102].

Six dalles de béton ont (1000x1000x100) mm³ été testés sous charges statiques. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes [102] :

- Les résultats expérimentaux garantissent que le renforcement de la géogrille peut retarder l'initiation et la propagation des fissures dans le béton; de plus, les modes de défaillance sont clairement affectés par la géogrille avant que la défaillance ne se produise ;
- Le renforcement de la géogrille a amélioré la ductilité des échantillons étudiés par rapport au béton ordinaire ;
- Le matériau Geocell n'est pas recommandé pour le renforcement des dalles, car il réduit la ductilité et la charge de rupture du béton en raison du mode de défaillance observé ;
- À partir de l'inspection visuelle pendant l'essai, on peut remarquer que la charge de défaillance de la dalle de béton ordinaire est égale à la première charge de fissuration alors que la charge de défaillance des dalles de géogrille est supérieure à sa première charge de fissure, En conséquence, la géogrille a engagé une plus grande partie de la dalle de béton dans le transport et la redistribution de la charge après l'apparition de fissures ;
- Par rapport à une seule fissure dans la dalle de béton ordinaire dans cette étude, une fissure secondaire a été produite dans les dalles de géogrille ;
- La dalle de renfort de fibres améliore légèrement la charge de rupture par rapport au béton ordinaire.



CHAPITRE II



**Caractérisation des matériaux de renforts
utilisés**

DEUXIEME PARTIE : METHODOLOGIE EXPERIMENTALE**II. Introduction**

Les bétons renforcés de fibres ont prouvé leur robustesse et leur efficacité, incitant ainsi les industriels à les adopter largement. D'abord utilisés dans les dallages industriels, le béton projeté pour la construction de tunnels et la réparation des canalisations d'assainissement, ces matériaux sont maintenant aussi employés pour les chaussées d'autoroutes et les parkings d'aérodromes. Grâce à leur résistance aux chocs et à l'abrasion, leur utilisation pourrait encore se diversifier.

Cette étude expérimentale porte sur l'utilisation de fibres "locales" pour renforcer le béton. Ces fibres métalliques (FM) proviennent des déchets d'usinage de pièces en acier sous forme de "copeaux", ainsi que des fibres en grilles de polypropylène (FPP). La première partie de ce travail consiste à caractériser expérimentalement le comportement mécanique des fibres ondulées (copeaux) et en polypropylène, sous sollicitations statiques (traction uni axiale) pour déterminer leur résistance maximale à la rupture et à l'arrachement. Le troisième chapitre explore la composition du béton, en mettant en avant la méthode "Dreux-Gorisse", qui permet de calculer les masses des différents composants pour un volume de 1m³. Le quatrième chapitre se concentre sur le comportement en flexion des dalles en béton renforcées par des fibres de récupération, en étudiant deux types de renforcement : les fibres métalliques (FM) et les fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM). Le cinquième chapitre consiste en des essais pour observer le comportement des dalles en béton renforcées par des fibres métalliques (FM) et des polypropylènes à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) en poinçonnement centré, ainsi que des essais pour étudier le comportement des dalles sous poinçonnement excentré. Le sixième chapitre examine l'impact de la température sur le comportement du béton renforcé par des fibres de récupération. Cette étude expérimentale vise à analyser l'effet des températures élevées sur des propriétés mécaniques telles que la compression et la flexion, en se concentrant sur le béton renforcé par des fibres métalliques (FM) ainsi que des polypropylènes à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM).

CHAPITRE II**CARACTERISATION DES MATERIAUX DE RENFORTS UTILISES****II.1.Introduction**

Le domaine de béton en fibres est très vaste et il existe une très grande diversité de fibres, autant au niveau des matériaux, de la géométrie, du mécanisme d'ancrage, que du dosage pouvant être introduit dans la matrice. Autant de variétés de fibres et de combinaisons possibles qui amènent des réponses différentes au niveau du comportement du matériau. Il est important de spécifier que la présente thèse concerne l'utilisation de fibres métalliques ondulées (copeaux) et les fibres en polypropylène sous sollicitations statiques (traction unie axiale) afin de déterminer la résistance maximale à la rupture de la fibre et à l'arrachement. L'intérêt réside dans l'optimisation de la longueur des fibres métallique ainsi que le nombre d'ondulation (spirale) à utiliser dans une matrice cimentaire, qui permettra d'améliorer les performances mécaniques en particulier la résistance des dalles en béton. Il est également important de noter que chaque mélange on utilise même type de fibres (métallique et polypropylènes).

II.2. Essai de caractérisation des fibres en traction

Les fibres métalliques (copeaux) et les fibres de polypropylène utilisées dans cette étude ont été sourcées localement à partir d'efforts de recyclage. Les fibres métalliques, obtenues sous forme de copeaux en tant que sous-produit de l'usinage de pièces en acier, ont été récupérées auprès de la société de véhicules industriels en Algérie connue sous le nom de SNVI. Ces fibres métalliques possèdent une forme géométrique ondulée distinctive, ce qui améliore leur capacité d'ancrage dans le béton. Dans notre étude, nous avons utilisé quatre longueurs de fibres différentes (30, 50, 70 et 80mm) avec des nombres variables d'ondulations (spirales) à 3, 5 et 7 ondulations par fibre. Pour chaque combinaison de longueur de fibre et d'ondulation, nous avons réalisé trois tests. Pour fixer les extrémités des fibres métalliques dans les mâchoires de serrage de la presse hydraulique, nous avons utilisé de la résine de fibre de verre pour améliorer leur ancrage. Pour étudier l'impact des dimensions du maillage sur la capacité de charge des dalles renforcées de fibres de polypropylène et, en particulier, sur le mode de défaillance, nous avons considéré deux types de maillage dans cette étude : des maillages petits (PPG/SM) et grands (PPG/LM). Pour une représentation visuelle des fibres utilisées

et de l'ancrage des extrémités des fibres métalliques, veuillez vous référer à la Figure II.1. Les propriétés mécaniques et géométriques détaillées des fibres utilisées sont fournies dans le Tableau II.1.

II.3. Etude expérimentale

Les fibres métalliques (copeaux) utilisées dans cette étude sont coupées en quatre longueurs différentes (30, 50, 70 et 80mm). Pour chaque longueur, elles présentent 3, 5 ou 7 ondulations/spirales. Nous avons réalisé 10 essais pour chaque combinaison de longueur et de nombre d'ondulations/spirales. En ce qui concerne les fibres en polypropylène, nous avons examiné deux types de mailles : les petites mailles (GPP/PM) et les grandes mailles (GPP/GM). La Figure II.1 présente les deux types de fibres utilisées ainsi que leurs dimensions. Les essais consistent en des tests de traction directe avec déformation contrôlée. Nous présentons ci-dessous la valeur caractéristique de la contrainte de rupture ainsi que les courbes et les comparaisons obtenues. Les propriétés mécaniques et géométriques détaillées des fibres utilisées sont fournies dans le Tableau II.1.

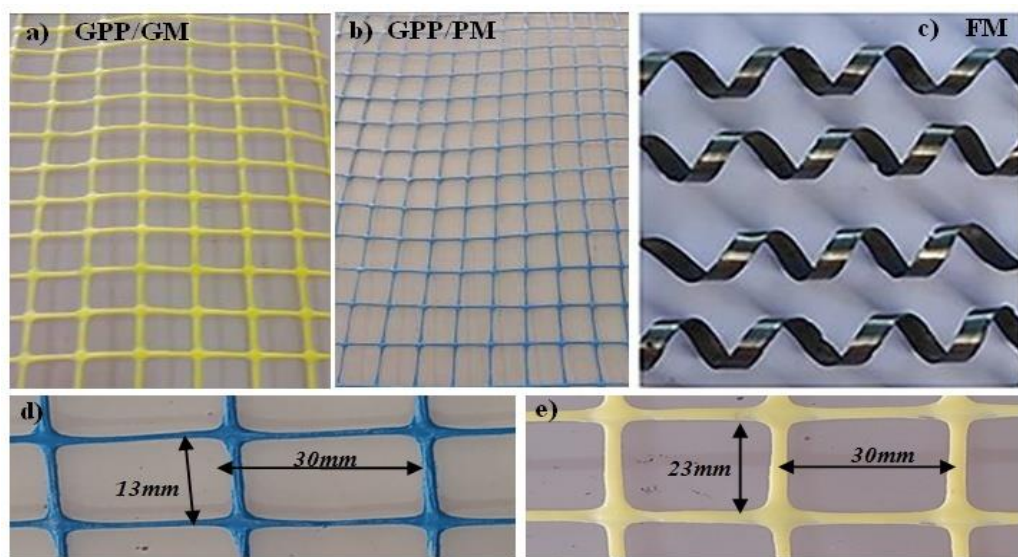


Figure II.1 Vue des fibres : a) grille grande mailles; b) grille petites mailles ; c) fibres métalliques d) dimensions de grille petite mailles ; e) dimensions de grille grande maille.

Type de fibres	L_f (mm)	l_r (mm)	e_p (mm)
Métalliques (FM)	30-50-70-80	2	0,6
GPP/PM	30	13	0,1
GPP/GM	30	23	0,3

Tableau II.1 Caractéristiques des propriétés mécaniques des fibres étudiées.

II.3.1. Géométrie de la fibre et système d'ancrage

Les deux types de fibres, métalliques et polypropylène, utilisées dans cette étude expérimentale, proviennent de la récupération. Les fibres métalliques sont issues des déchets d'usinage des pièces en acier, récupérées auprès de la Société Nationale des Véhicules Industriels en Algérie (SNVI). Leur forme géométrique ondulée en spirale leur confère un ancrage parfait. En revanche, les fibres en polypropylène sont récupérées sous forme de grilles. Les deux extrémités des copeaux ont été ensimées à l'aide d'une résine de fibres de verre dans un moule spécial afin 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.2 Système d'ancrage.

II.3.2. 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 cellule de force maximale évaluée à 200kilosNewtons (kN). Cette machine est équipée d'un logiciel spécialisé, pour le contrôle et pour le traitement des résultats, permettant la création de diagrammes représentant les relations force-déplacement et force-temps. La vue du dispositif d'essais est présentée par la Figure II.3.



Figure II.3 Vue du dispositif d'essai.

II.3.3. Présentation des résultats

Les courbes moyennées (trois essais pour chaque longueur), pour les fibres métalliques (FM) représentant la contrainte en fonction de la déformation pour chaque série d'essais (longueur de 30, 50, 70 et 80mm) et pour un nombre d'ondulations de 7, 5 et 3 pour chaque série, sont données aux Figures (II.4, II.5, II.6 et II.7).

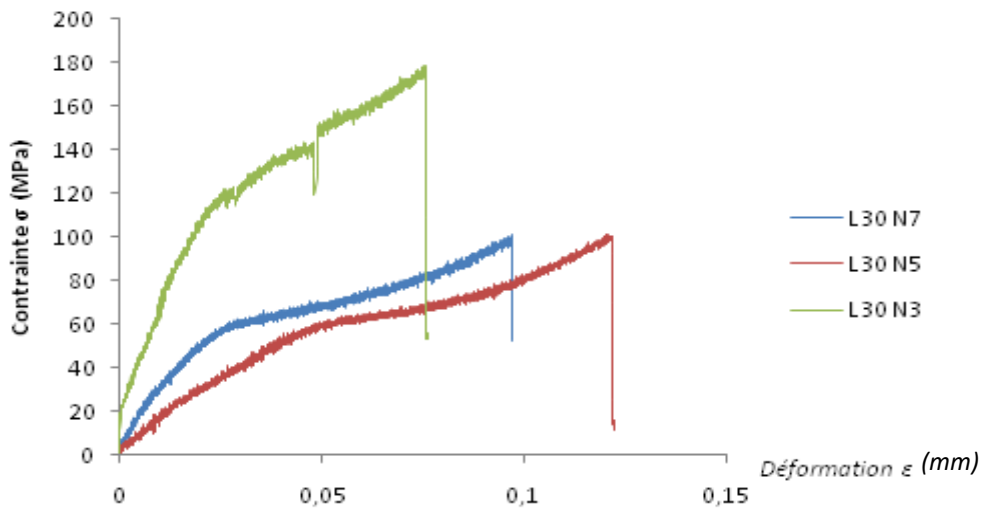


Figure II.4 Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 30\text{mm}$.

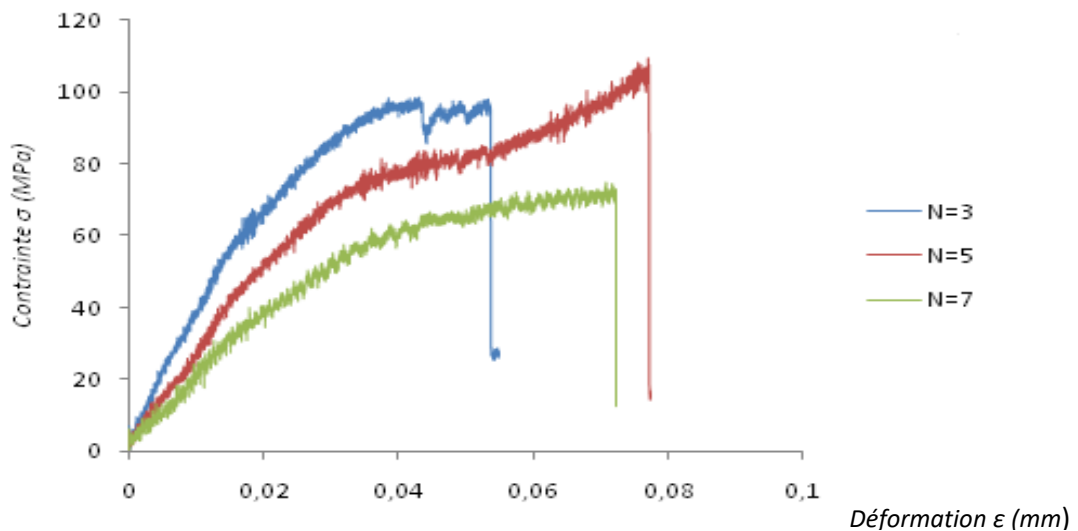


Figure II.5 Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 50\text{mm}$.

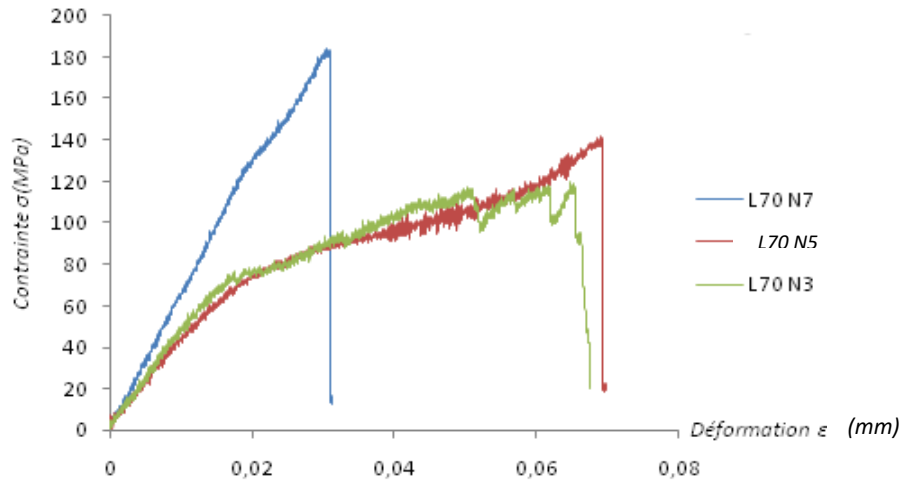


Figure II.6 Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 70\text{mm}$.

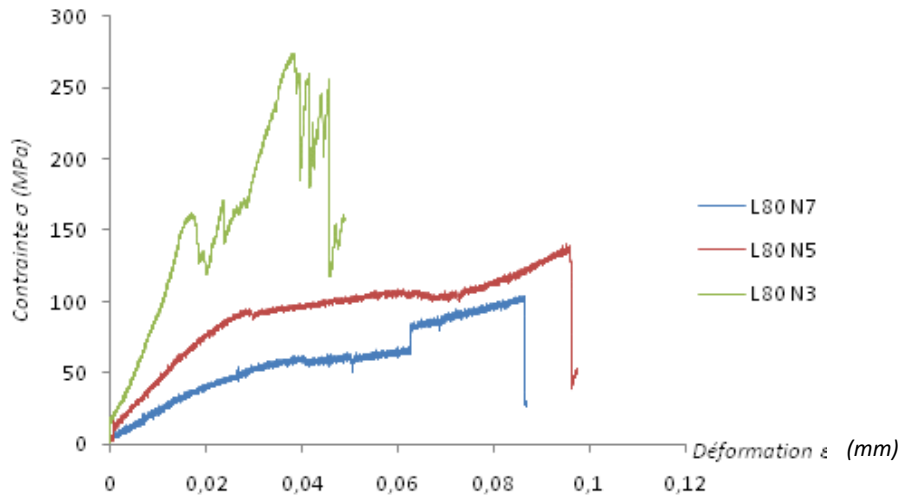


Figure II.7 Contrainte- déformation $\sigma=f(\epsilon)$ pour $L= 80\text{mm}$.

On donne sur la Figure II.8 suivante la superposition des courbes moyennes contrainte - déformation pour les meilleures courbes obtenues.

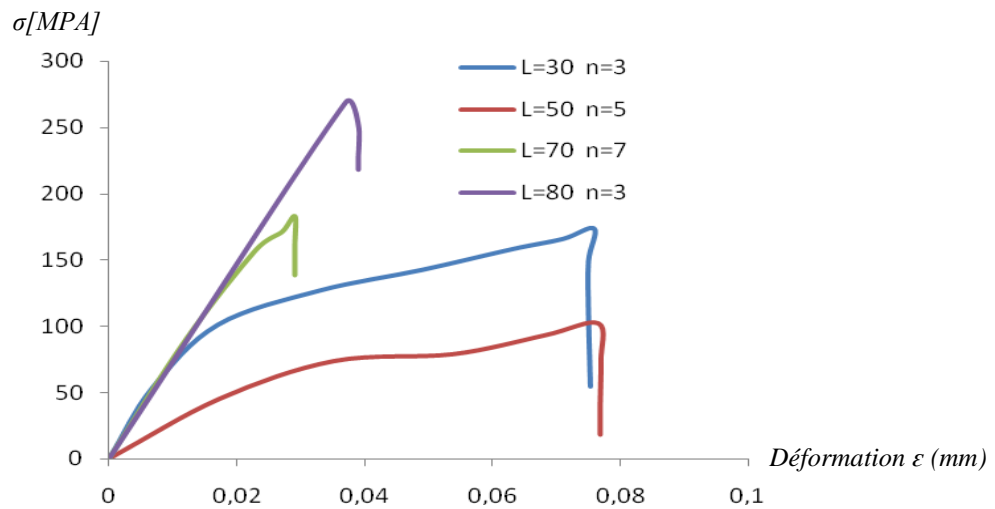


Figure II.8 Superposition des courbes moyennes contrainte – déformation.

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 augmente avec le nombre d'ondulation, elle atteint $R_m = 275\text{MPa}$ pour une longueur $L = 80\text{mm}$ et $n = 3$ (ondulations).

Il apparaît que la fibre de longueur 30mm est plus ductile par rapport aux autres longueurs avec cependant une rigidité dans la première phase plus faible.

La Figure II.9 illustre la meilleure courbe contrainte-déformation pour les fibres de polypropylène.

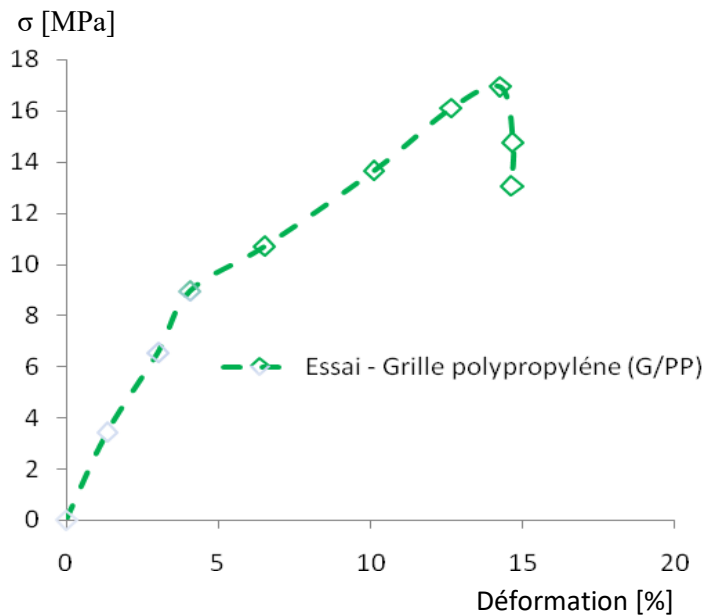


Figure II. 9 Courbe moyenne contrainte-déformation pour les fibres polypropylène.

La Figure II.9 présente les valeurs moyennes de trois courbes contrainte-déformation ($\sigma = f(\epsilon)$). Cette étude a facilité la détermination de la résistance à la traction des fibres en grille de polypropylène utilisées, révélant une résistance moyenne de $R_m = 16,92\text{MPa}$.

II.3.4. Comportement des fibres métalliques en traction directe sous forme des Histogrammes

Les Figures (II.10, II.11, II.12, et II.13), représentant la contrainte en fonction de la déformation pour chaque série d'essais (longueur de 30, 50, 70 et 80mm) et pour un nombre d'ondulations de 7, 5 et 3 correspondent. La représentation de ses résultats, sous forme d'histogrammes, est donnée ci-dessous.

- Avec : F_m : Charge maximale;
- R_m : Résistance en traction;
- C_{max} : Course maximum.

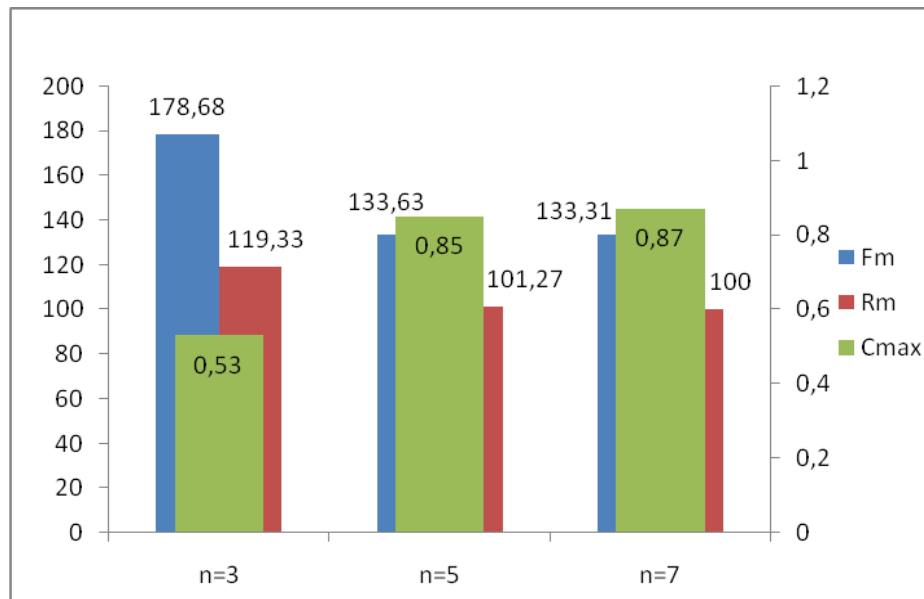


Figure II.10 Histogramme pour L = 30mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.

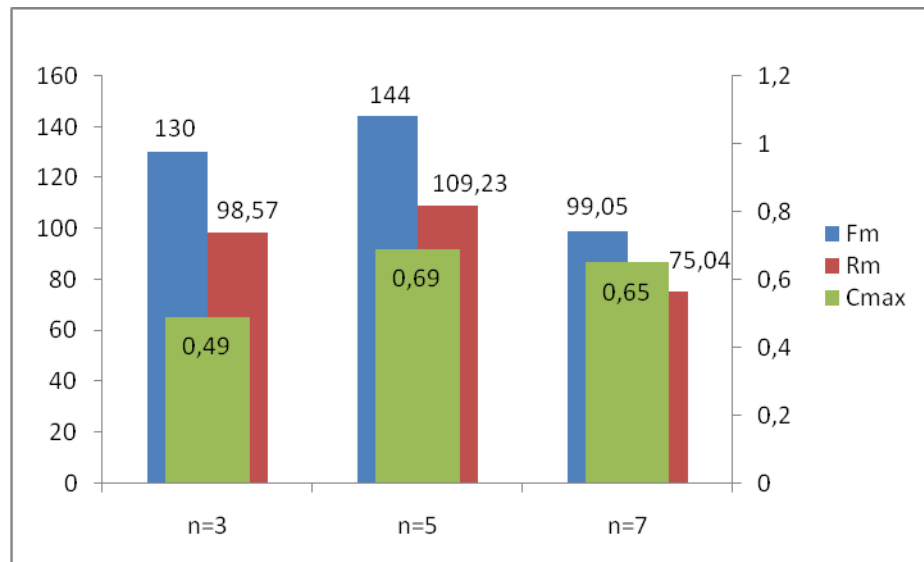


Figure II. 11 Histogramme pour L = 50mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.

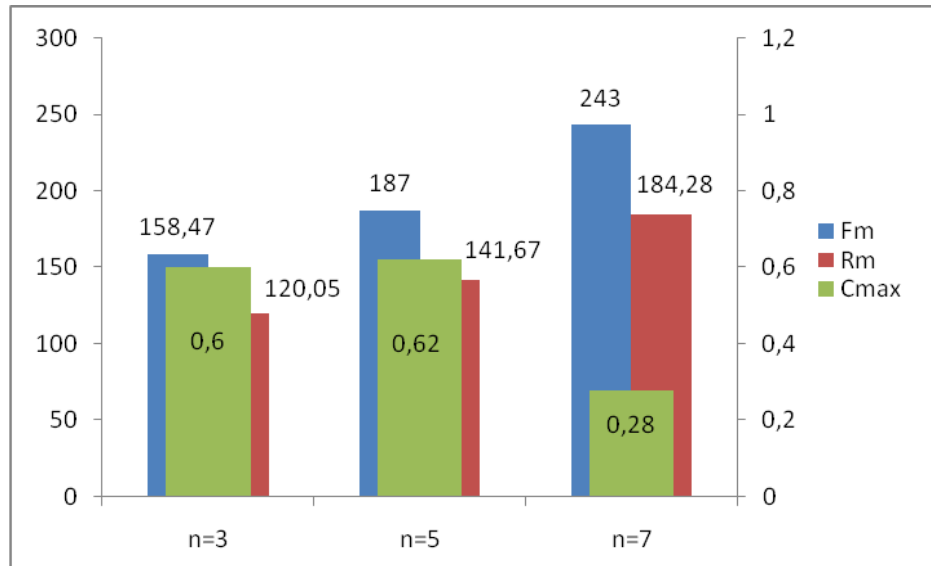


Figure II. 12 Histogramme pour L = 70 mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.

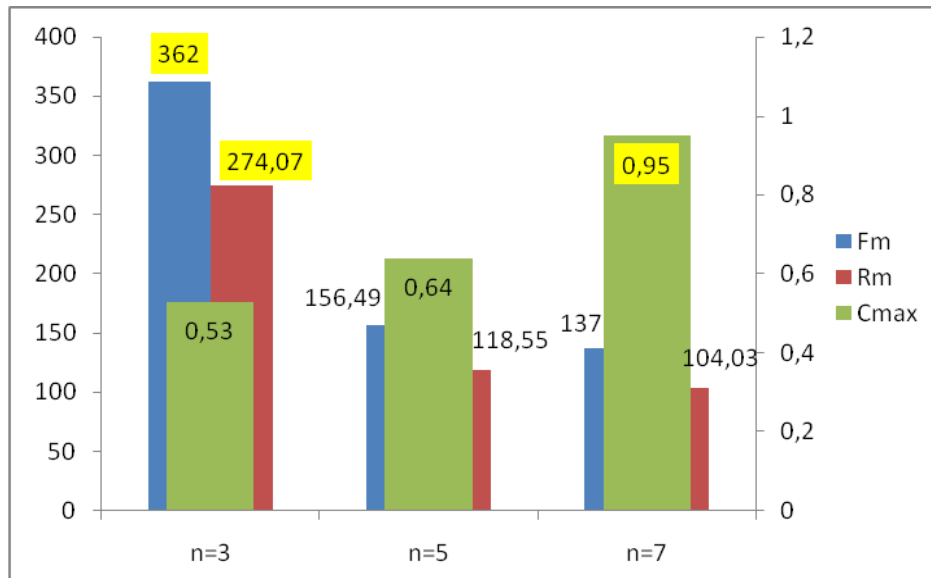
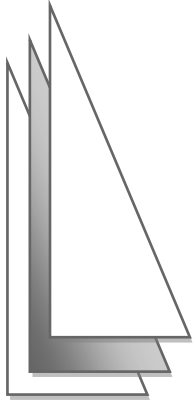


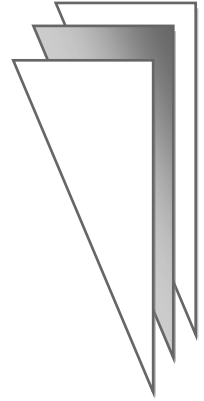
Figure II. 13 Histogramme pour L = 80 mm, n = 7, 5 et 3 ondulations.

II.4. Conclusion

Cette partie de notre étude a mis en lumière l'influence de la longueur des fibres métalliques (FM) et du nombre d'ondulations sur leur résistance en traction. Nous avons constaté que la meilleure résistance est obtenue avec une longueur de 80mm et 3 ondulations (spirales). Lors des essais de traction, les ondulations ont tendance à s'aplatir avant que l'acier des fibres ne commence à s'étirer. Par ailleurs, cette étude a permis de déterminer que les fibres de polypropylène, notamment celles à grandes mailles, offrent la meilleure résistance à la traction, avec une valeur de 16,42MPa.



CHAPITRE III



Comportement en flexion des dalles en béton renforcées par des fibres de récupération

CHAPITRE III**COMPORTEMENT EN FLEXION DES DALLES EN BETON RENFORCEES
PAR DES FIBRES DE RECUPERATION****III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au comportement en flexion des dalles en béton renforcé par deux types de fibres : les fibres métalliques (FM) et les fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et à grandes mailles (GPP/GM). À cette fin, deux séries d'essais en flexion (essais de flexion 3-points) sur des dalles de dimensions [7x25x50] cm³ ont été réalisés au laboratoire de Génie Civil, dans le but d'étudier le comportement du béton renforcé de fibres en flexion. Pour cette étude, cinq taux de teneur en fibres métalliques ont été retenus ($W = 0,2\%$, $W = 0,4\%$, $W = 0,6\%$, $W = 0,8\%$ et $W = 1\%$), ainsi que des fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM). Pour chaque série d'essais, des éprouvettes de béton témoin (BT), sans fibres, ont été réalisées pour chaque série de tests. Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de dimensions [16x32] cm².

III.2. Géométrie et composition des spécimens**III.2.1. Géométrie des éprouvettes**

Le coffrage utilisé pour la réalisation des dalles est un coffrage en bois, constitué de plaques démontables (voir Figure III.1), il a été imprégné par un agent démoulant pour faciliter le décoffrage des spécimens après la prise du béton. Les dimensions des dalles utilisées [25x50x7]cm³, de largeur $L = 25\text{cm}$, longueur $l = 50\text{cm}$ et une épaisseur $e = 7\text{cm}$ (voir vue donnée à la Figure III.2). Les fibres métalliques (FM) sont disposées d'une manière aléatoire dans la matrice cimentaire, par contre les fibres en grilles de polypropylène sont disposées en couches. Une vibration du mélange a été effectuée lors du coulage.



Figure III.1 Coffrage des dalles utilisées.

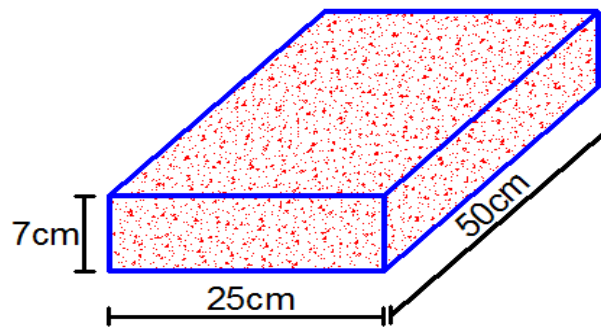


Figure III.2 Dimensions des dalles utilisées.

III.2.2. Composition des dalles

La composition des dalles est un mélange de béton et de fibres (fibres métalliques et de fibres en grilles polypropylènes). La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de Dreux-Gorisse, la même composition a été utilisée pour chaque série de tests. Les constituants du béton pour un 1m^3 et pour les dalles dimensions $[25 \times 50 \times 7]\text{cm}^3$ est illustré dans le Tableau III.1.

Constituants	Masse / m ³ (kg)	Masse pour un volume [25x50x7] cm ³
Sable 0/3	753 kg	6,60 kg
Gravier 3/8	171kg	1,50 kg
Gravier 8/15	895kg	7,84 kg
Ciment CPJ CEM II/A 42.5 (c)	380 kg	3,33 kg
Eau (E)	206,52 kg	1,81 kg
Fluidifiant (0,5% du poids de ciment)	200,00 ml	0,67 ml

Tableau III.1 Constituants du béton pour un volume de 1m³ et la quantité correspondante pour un volume de [25x50x7]cm³.

La masse pour les teneurs en fibres pour 1m³ de béton, ainsi pour une dalle de dimensions [25x7x50] cm³, est donnée dans le Tableau IV.2.

Fraction volumique des fibres (W%)	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%	fibres Polypropylène
Masse pour 1m ³ (kg)	15,77	31,54	47,31	63,08	78,85	950
Pour une dalle [25x50x7] cm ³ (kg)	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	8,32

Tableau III.2 Masse des différentes teneurs en fibres pour 1m³ de béton et pour une dalle [25x50x7] cm³

III.2.3. Confection des spécimens dalles et la mise en œuvre du béton

Le coffrage utilisé pour la réalisation des dalles est un moule en bois, constitué de plaques démontables, il a été imprégné par un agent démoulant pour faciliter le décoffrage des spécimens après la prise du béton (Figure IV.1).

En utilisant un malaxeur de notre laboratoire pour toutes les séries d'essais effectués à axe vertical, constitué de cuve et de palettes centrales tournantes, sa capacité est de 65 litres (voir Figure IV.3). Cet utile de malaxage est un type très efficace et fourni dans la plupart des cas un béton très homogène. Après malaxage, les dalles ont été confectionnées en respectant les procédures suivantes :

- a) Coulage des dalles, plus, les fibres Métalliques (FM) à la fois, avec une disposition des fibres aléatoirement ;

b) Réalisation de dalles avec des fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et à grandes mailles (GPP/GM) est effectuée en cinq (05) étapes, dans l'ordre établi.

1. Coulage de la première couche de béton (couche d'enrobage) ;
2. Pose de la première nappe de la grille;
3. Coulage d'une autre couche de béton;
4. Pose de la deuxième nappe de la grille;
5. Coulage de la dernière couche de béton (couche de surface).

Pour assurer la continuité de la matrice béton, il est recommandé, à chaque étape, de réaliser une vibration du béton, à l'aide d'une table vibrante. Pour les grandes dalles, de préférence, il faut utiliser une vibration externe par une aiguille vibrante de diamètre = 40mm (Figure III.3). Chaque série de dalles, comporte trois (03) éprouvettes réalisées à partir de la même gâchée du béton.

Juste après le bétonnage, toutes les dalles ont été recouvertes d'un tissu en plastique pour éviter la fissuration précoce due au retrait. Les spécimens seront démoulés à 24h après le coulage. Toutes les éprouvettes ont été mises en mûrissement, dans des bacs d'eau à une $T^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$, pendant une durée de 28 jours, selon la norme européenne (NF 2001) relative à la confection et la conservation des éprouvettes.



Figure III.3 Malaxeur à axe vertical de capacité 65 litres et le vibreur employé.

III.3. Essais de compression

Pour évaluer les propriétés mécaniques du béton utilisé, nous avons effectué des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques normalisées mesurant 32cm de hauteur et 16cm de diamètre, conformément à la norme NF EN12390-4, comme illustré dans la Figure III. 4a). Ces essais ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique de type AUTOTEST contrôlée par un micro-ordinateur, comme indiqué dans la Figure IV. 4b). La presse hydraulique avait une capacité maximale de 2000kilos Newton (kN).



Figure III.4. a) Tube d'essai cylindrique.



Figure III. 4. b) Presse hydraulique.

➤ Résultats des essais de compression

Les résultats à la compression après écrasement à 30jours, qui correspondent à trois essais (cylindres) sont donnés par les Figures IV.5, IV.6 et IV.7.

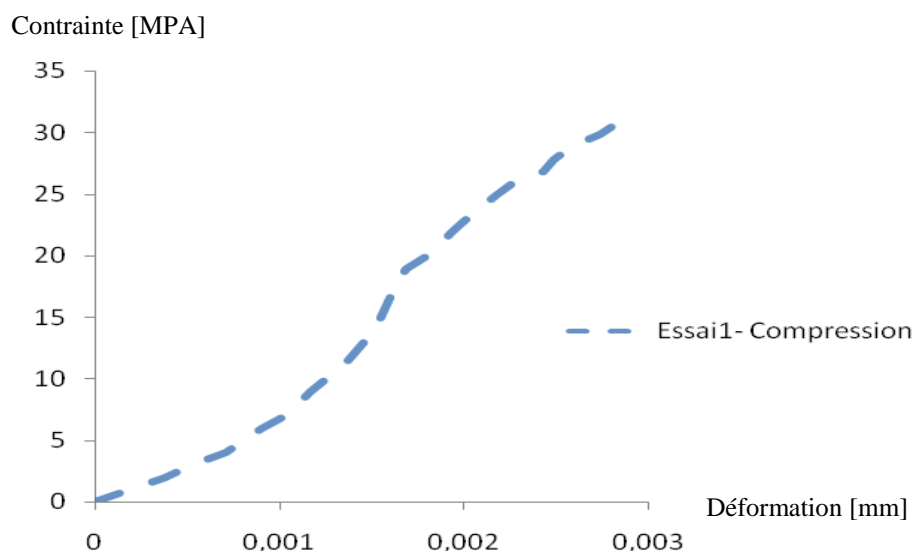


Figure III.5 Courbe moyenne contrainte – déformation d'essai 1.

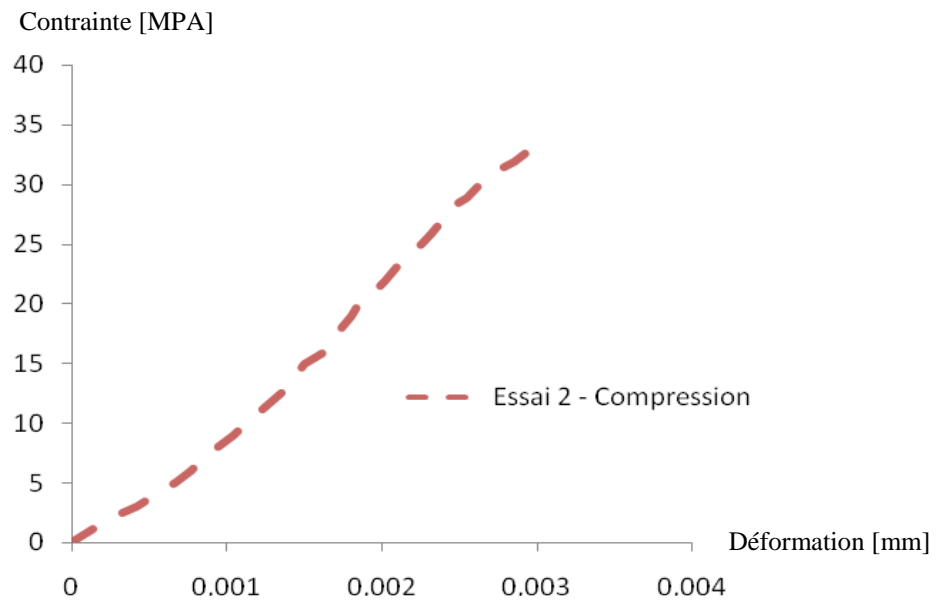


Figure III.6 Courbe moyenne contrainte – déformation d’essai 2.

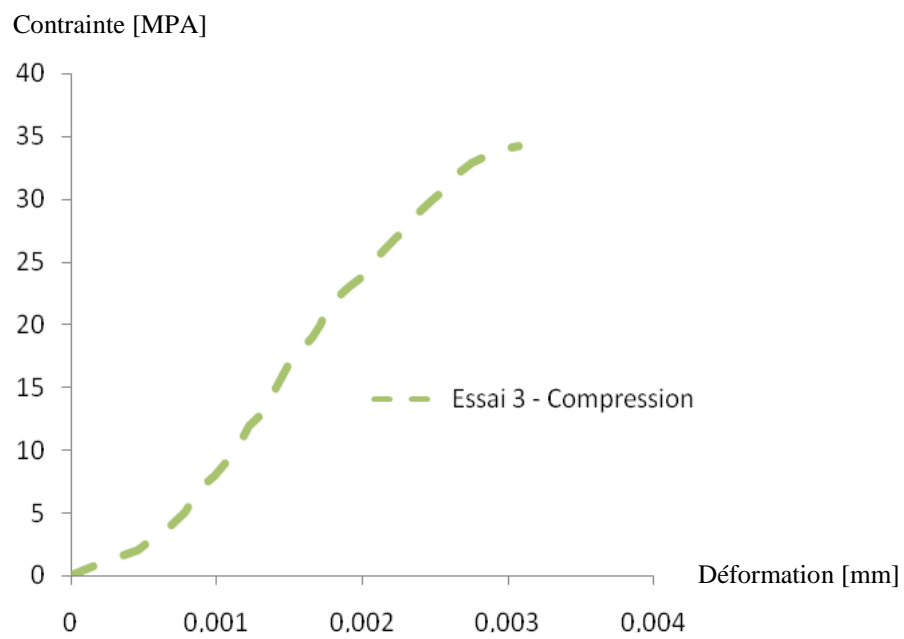


Figure III.7 Courbe moyenne contrainte – déformation d’essai 3.

Les courbes contraintes déformation obtenues pour différents tests après écrasement à 28 jours sont présentées dans la Figure III.8.

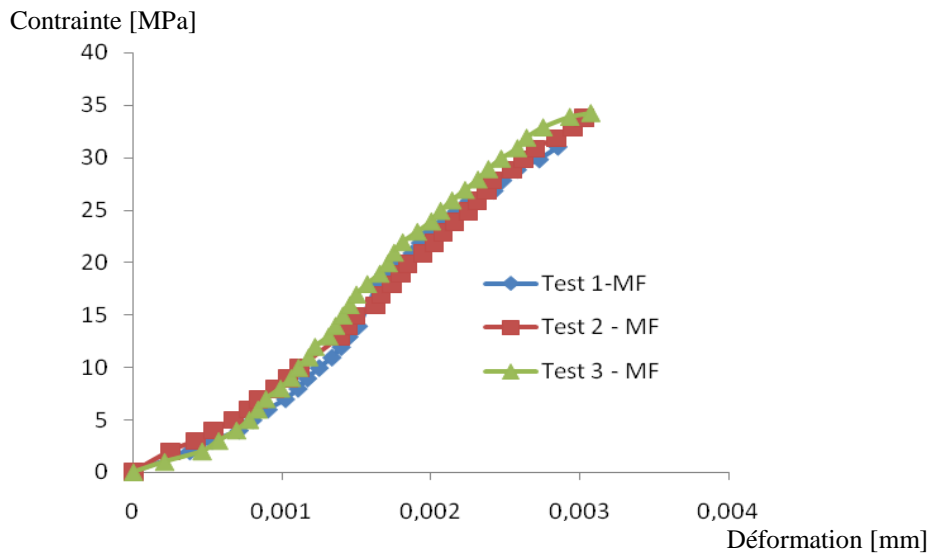


Figure III.8 Courbes contrainte déformation moyenne en compression.

Les propriétés mécaniques mesurées du béton, obtenues à partir des différents tests après écrasement à 28 jours, sont présentées dans le Tableau III.3.

Essais	Résistance à la compression à 28j [MPa]	Module d'élasticité [MPa]
Essai 1	31,06	30728
Essai 2	33,83	31401
Essai 3	34,20	32533
Moyenne	33,03	31554

Tableau III.3 Caractéristiques mécaniques du béton.

La Figure III.8 illustre la superposition des courbes contraintes déformations moyennes des trois séries de tests, et le Tableau III.3 présente les caractéristiques mécaniques du béton. Sur la base des résultats et des données examinées, la contrainte de compression moyenne déterminée à partir de la composition du béton est de 33,03MPa. Selon les normes européennes, cela correspond à une classe de béton C25/30, recommandées pour la construction d'éléments porteurs dans les bâtiments. De plus, le module d'élasticité mesure 31554MPa, ce qui correspond à la classe de béton C25/30 standards selon EUROCODE 2 [64].

III.4. Essais de flexion 3-points

Afin de suivre le comportement des dalles renforcées par des fibres en flexion (flexion à trois points), deux séries d'essais ont été réalisées. La première série d'essais (série 1) a concerné des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM), tandis que la deuxième série d'essais (série 2) portait sur des dalles renforcées par des grilles en fibres de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM). En tout, vingt-quatre dalles de dimensions $[25 \times 50 \times 7]$ cm³ ont été testées. Les essais ont été effectués au laboratoire de Génie Civil, utilisant la machine de type « IBERTEST ».

III.4.1. Première série d'essais « série 1 »

Afin d'étudier le comportement de dalles en béton renforcées par des fibres métalliques (FM) en flexion, des essais (18) ont été réalisés sur des dalles de dimensions $[25 \times 50 \times 7]$ cm³. Les teneurs en fibres retenues pour cette série sont les suivantes : $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$, ainsi que $W=1\%$, en plus du béton témoin BT (sans fibres). Les fibres sont disposées de manière aléatoire dans la matrice cimentaire.

III.4.2. Deuxième série d'essais « série 2 »

L'objectif principal de cette deuxième série d'essais (série 2) consiste à réaliser des essais visant à suivre le comportement en flexion des dalles en béton renforcées par des grilles de fibres de polypropylène. Afin de mettre en évidence l'influence des dimensions de la maille de la grille sur la capacité portante de la dalle renforcée, en particulier sur le mode de rupture, deux types de mailles ont été pris en compte dans cette étude : les petites mailles (GPP/PM) et les grandes mailles (GPP/GM). La disposition des grilles de fibres de polypropylène pour les deux variantes (GPP/PM et GPP/GM) sur toute la hauteur de la dalle est présentée respectivement par les Figures III.9 et III.10.

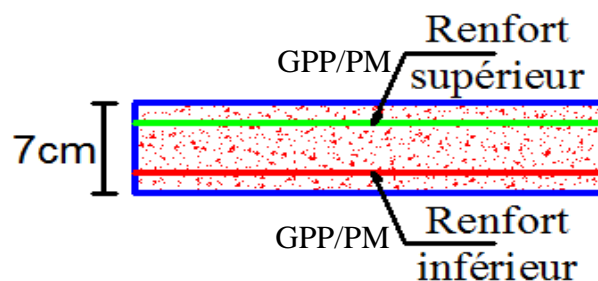


Figure III. 9 Disposition des grilles de petites mailles.

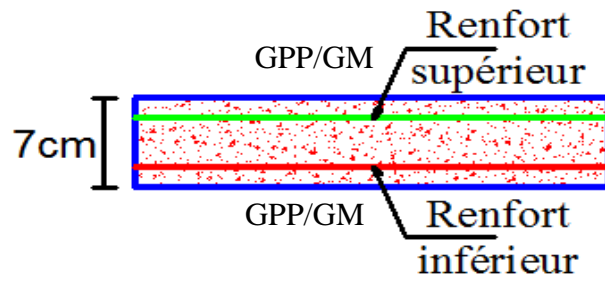


Figure III.10 Disposition des grilles de grandes mailles.

La Figure III.11 présente le schéma statique de l'essai de flexion 3-points.

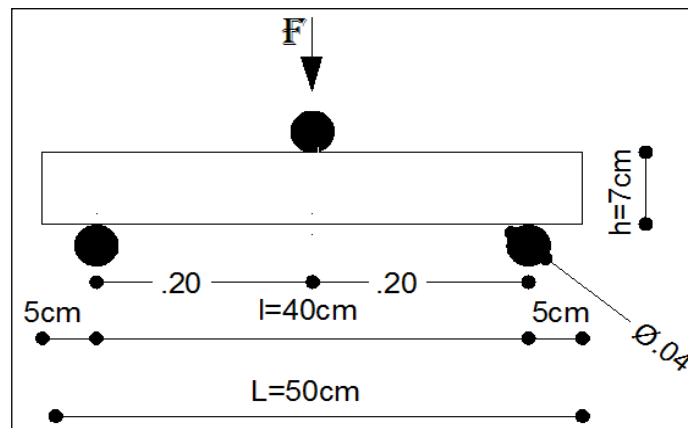


Figure III.11 Schéma statique de l'essai de flexion 3- points.

La Figure III.12 illustre le dispositif et le principe de flexion 3-points.



Figure III.12 Dispositif et principe de support à 3-points

III.4.3. Résultats des essais de flexion 3-points

III.4.3.1. Première série d'essais « série1 »

La Figure III.13 montre un exemple du mode de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques FM (série 1).

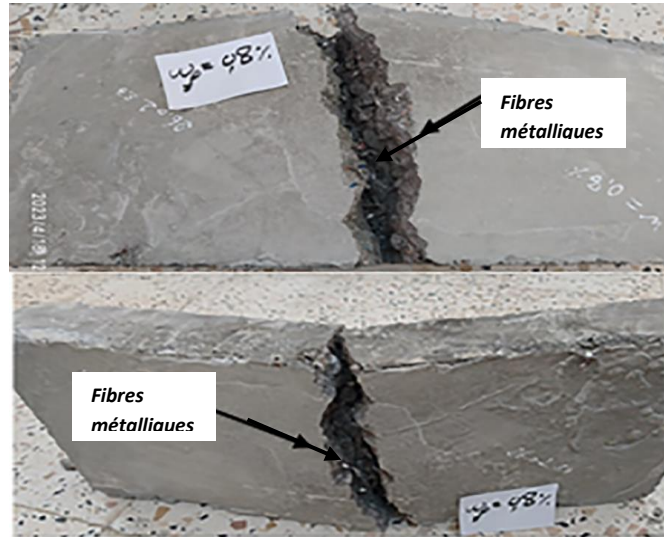


Figure III.13 Exemple de mode de rupture de la série 1

La Figure III.14 montre la superposition des courbes moyennes force-déformation à mi-portée des dalles renforcées avec des fibres métalliques FM (série 1) pour les teneurs en fibres $W = 0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$, et $W=1\%$, ainsi qu'un béton témoin BT(sans fibres) qui servent de référence.

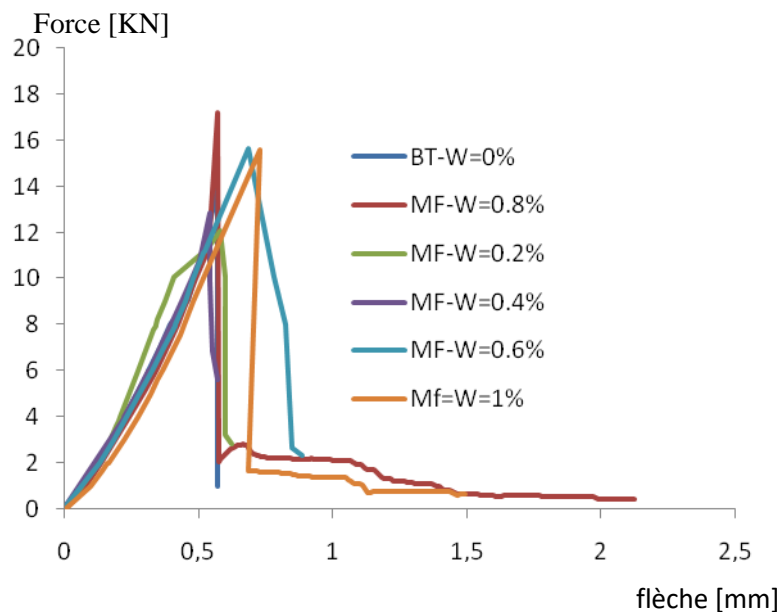


Figure III.14 Superposition des courbes force-flèche pour les dalles de la série 1.

D'après les résultats de la première série d'essais (Figure III.14) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche des dalles renforcées de fibres métalliques (FM) testées, pour les teneurs en fibres, $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et $W=1\%$ et le BT ($W=0\%$), ainsi que d'après le mode de rupture de ces dalles testées (Figure III.13) lors des d'essais en flexion 3-points, on a constaté :

Les courbes obtenues (Figure III.13), montrent que le comportement des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) pour les teneurs en fibres $W=0,2\%$, $W=0,4$ et $W=0,6\%$ ainsi que le béton témoin BT ($W=0\%$) ont une rupture fragile, par contre les dalles avec des teneurs en fibres $W=0,8\%$ et $W=1\%$ ont une rupture ductile. Ça s'explique par les nombres importants des fibres traversant les deux bords de la dalle après rupture du béton (voir le mode de rupture de la Figure III.13).

Les courbes obtenues, montrent aussi que c'est un comportement en flexion simple, on remarque que la résistance et la rigidité en flexion des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ est meilleur que les dalles avec des teneurs en fibres $W=0,2\%$, $W=0,4$, $W=0,6\%$ et 1% et les dalles sans fibres (BT).

Il apparait que l'ajout de fibres avec des teneurs $W=0,8\%$ et $W=1\%$ confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin BT (sans fibres). D'autre part le comportement du béton de fibres en flexion pour ces deux teneurs en fibres, 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 dalle, 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.13) ce qui permet d'éviter une rupture brutale.

Ces résultats de la première série (Figure III.14) nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r=17,21\text{kN}$) est augmenté d'environ 24%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F=13,91\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 8 %.

Le Tableau III.4 résume les forces (charges) à la rupture en flexion des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) testées (série 1) pour les différents teneurs en fibres ($W=0,2\%$ et $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et $W=1\%$) et le béton témoin BT (sans fibres), ainsi que le nombre de fibres traversant les deux bords des dalles pour chaque teneur en fibres.

Type de fibres	Force maximale à la rupture F_r [kN]	Déformation flèche en travée [mm]	Nombres de fibres traversant les deux bords de la dalle	Mode de rupture
BT ($W=0\%$)	13,91	0,497	/	Rupture fragile
FM- $W=0,2\%$	12,083	0,521	[5-8]	Rupture fragile
FM- $W=0,4\%$	12,86	0,541	[10-12]	Rupture fragile
FM- $W=0,6\%$	15,65	0,687	[13-15]	Rupture fragile
FM-$W=0,8\%$	17,21	0,536	[22-26]	Rupture ductile
FM- $W=1\%$	15,56	0,688	[16-18]	Rupture ductile

Table III.4 Résistances à la rupture en flexion des dalles testées (série 1).

III.4.3.2. Deuxième série d'essais « série2 »

La Figure III.15 montre un exemple du mode de rupture des dalles renforcées de fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) (série 2) testées lors d'essais de flexion.

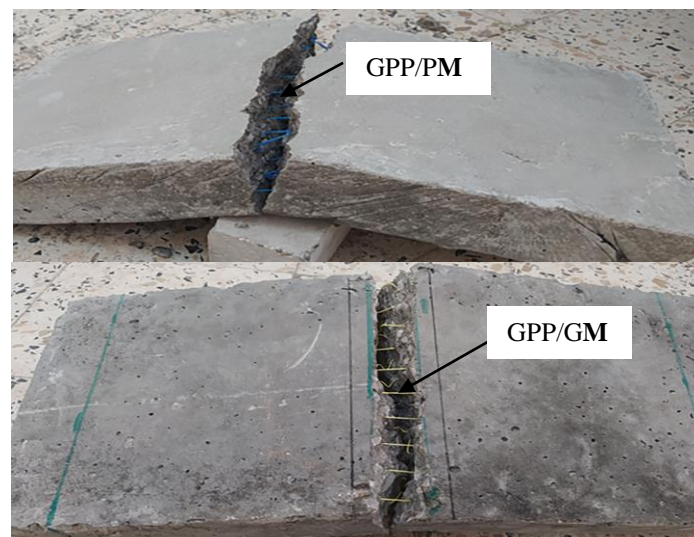


Figure III. 15 Exemple de mode de rupture des dalles de la série 2.

Les Figures III.16, III.17 et III.18 présentent les courbes moyennes, force en fonction de la flèche pour les dalles sans fibres (BT) et les dalles renforcées avec des fibres en polypropylènes de petites et de grandes mailles (GPP/PM, GPP/GM).

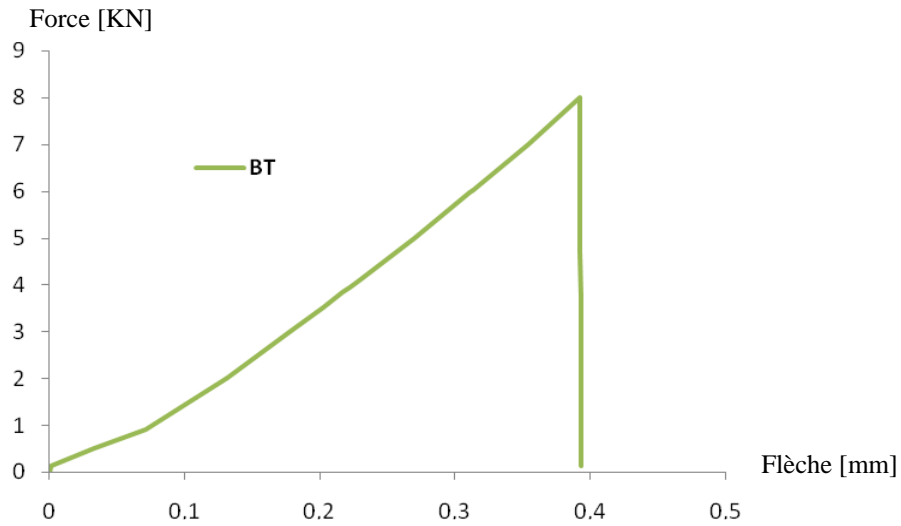


Figure III.16 Courbe Force-flèche pour le Béton témoin BT (W=0%).

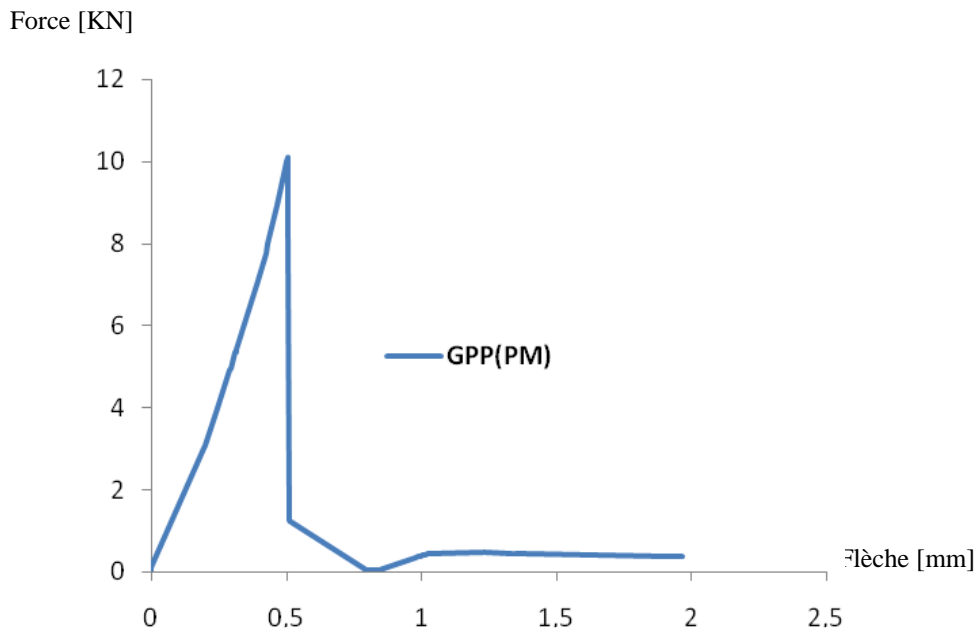


Figure III.17 Courbe Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène (GPP/PM).

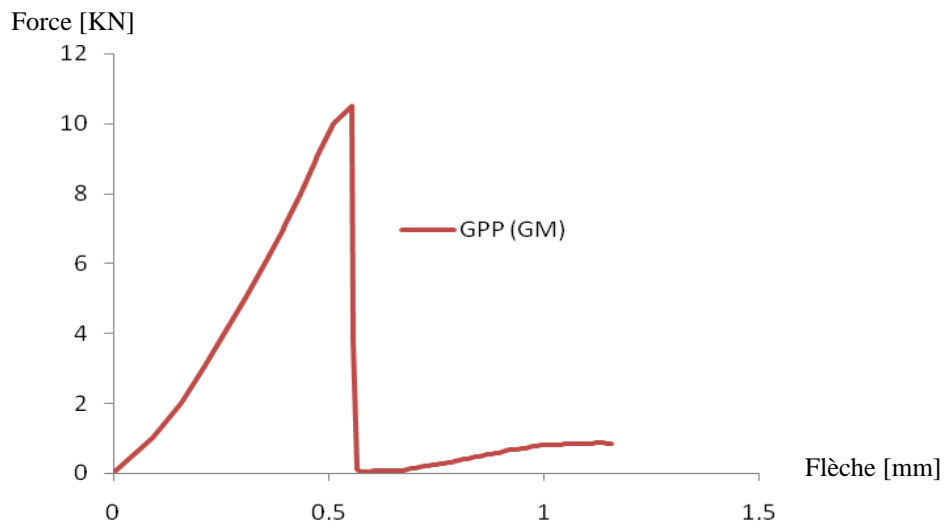


Figure III.18 Courbe Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène (GPP/GM).

La Figure III.19, illustre la Superposition des courbes Force-flèche pour les deux grilles en Polypropylène (GPP/PM), (GPP/GM) et le béton témoin BT (sans fibres).

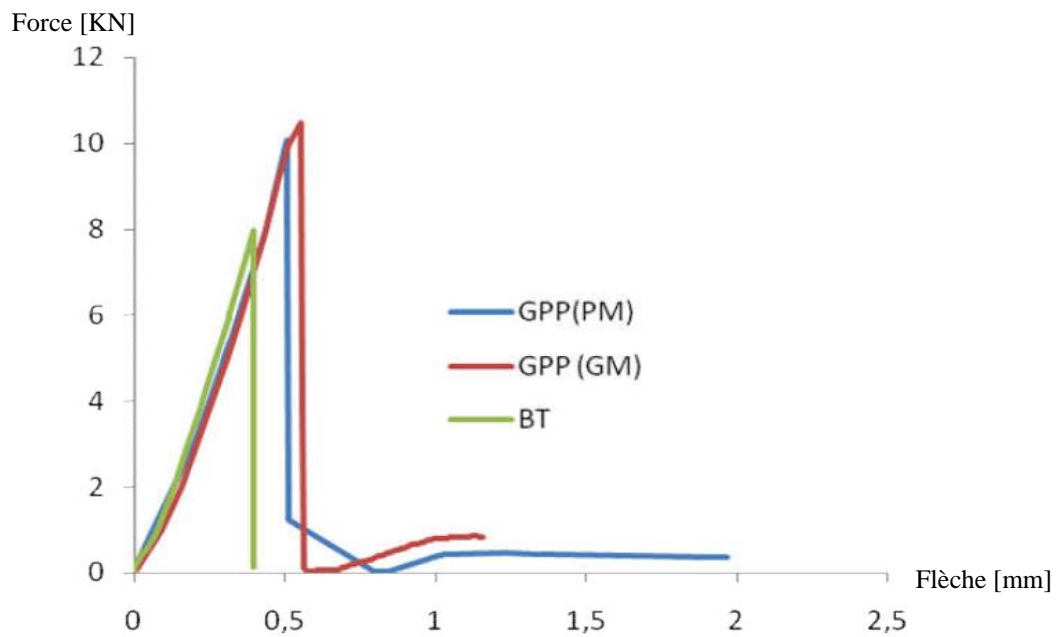


Figure III.19 Superposition des courbes Force-flèche des dalles renforcées par des grilles (GPP/PM) et (GPP/GM).

D'après les résultats de la deuxième série d'essais (Figure III.19) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et grande maille (GPP/GM) testées ainsi que BT (sans fibres), le mode de rupture pour les deux grilles est une rupture fragile (Voir Figure III.19).

Les courbes obtenues (Figure III.19), montrent que la résistance et la rigidité en flexion des dalles renforcées par des grilles polypropylènes de grandes mailles (GPP/GM) sont les meilleurs que celles renforcées par des grilles polypropylènes de petites mailles (GPP/PM) et les dalles sans fibres (BT).

Ces résultats de la deuxième série (Figure III.19), nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grandes mailles (GM) ($F_r=10,49\text{kN}$) est augmenté d'environ 31%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=8,00\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 41,32 %.

Le Tableau III.5 résume les forces (charges) à la rupture en flexion des dalles renforcées par des fibres en grilles polypropylènes petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) testées (série 2), ainsi que le béton témoin BT (sans fibres).

Teneurs en fibres (%)	BT (W= 0%)	GPP/PM	GPP/GM
Forces à la rupture (kN)	8,00	10,08	10,49

Tableau III.5 Forces à la rupture en flexion des dalles testées (série 2).

La Figure III.20, illustre la superposition de meilleures courbes obtenues en flexion par les dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) (série 1) et les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) (série 2), ainsi que le béton témoin BT (sans fibres).

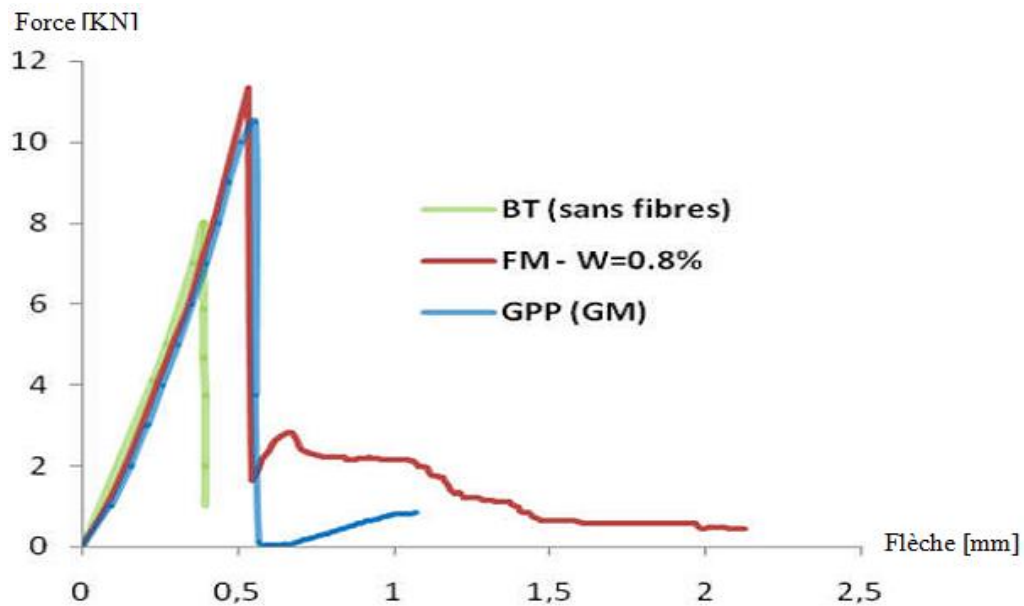


Figure III.20 Superposition des meilleures courbes Force-flèche des dalles renforcées par des grilles en Polypropylène et les fibres Métalliques (FM) et le BT.

D'après la Figure III.20, On constate bien que la résistance et la rigidité en flexion des dalles renforcées avec des fibres de Métallique (FM) avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ soient meilleures que les dalles renforcées avec des grilles en propylènes de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM). On constate aussi que le mode de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) à un comportement ductile après fissuration du béton, par contre les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petite et grande maille ont un comportement fragile après fissuration du béton.

III.5. Conclusion

Cette étude expérimentale a été menée dans le but de saisir et de comprendre l'impact ou l'effet que peut avoir l'introduction des fibres métalliques (FM) dispersées aléatoirement dans la matrice cimentaire, ainsi que les fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) sur le comportement en flexion des dalles en béton.

Les essais réalisés sur des petites dalles renforcées de fibres métalliques (FM) (série 1) et sur les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) (série 2), ont pour objectif de suivre leur comportement en

flexion. Les résultats des essais effectués en flexion montrent que l'ajout de fibres métalliques (FM) pour les teneurs en fibres $W=0,8\%$ et $W=1\%$ confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin BT (sans fibres), ainsi que par rapport aux autres teneurs, dont on a obtenu des ruptures ductiles au lieu de ruptures fragiles. Ces résultats de la première série (série 1) nous ont également permis de constater que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r=17,21$ kN) est augmenté d'environ 16% par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=13,91$ kN). En revanche, la déformation (flèche) est augmentée d'environ 8%. Par ailleurs, les résultats des dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) (série 2), montrent une rupture fragile.

Les résultats de la deuxième série (série 2) nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=10,49$ kN) est augmenté d'environ 31%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=8,00$ kN). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 41,32%.

CHAPITRE IV

Etude de poinçonnement et de résistance à l'effet de la température élevée sur les dalles en béton renforcées avec des fibres de récupération

CHAPITRE IV**ETUDE DE POINÇONNEMENT ET DE RESISTANCE A L'EFFET DE LA TEMPERATURE ELEVEE SUR LES DALLES EN BETON RENFORCEES AVEC DES FIBRES DE RECUPERATION****IV.1. Comportement en poinçonnement des dalles en béton renforcées par fibres de récupération****IV.1.1. Introduction**

Cette étude se divise en deux parties distinctes : la première se concentre sur le comportement des dalles en béton renforcées par des fibres de récupération sous poinçonnement centré, tandis que la seconde examine le comportement des dalles sous poinçonnement excentré. Pour chaque type de chargement, nous avons utilisé des fibres métalliques (FM) ondulées, ainsi que des fibres en grilles de polypropylène de mailles variées, petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM). Au total, 48 dalles de dimensions [25x50x7]cm³ ont été fabriquées pour ces expériences, réalisées au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, à l'aide d'une machine de type "IBERTEST".

IV.1.2. Mode de chargement et acquisition

Après 28 jours de murissement, les dalles sont testées au chargement de poinçonnement progressif. La machine d'essai est de type ELE (IBERTEST) de capacité de 200kN, équipée d'une chaîne d'acquisition et de contrôle numérique. Un traitement statistique automatique est réalisé à chaque fin de série de tests. L'essai est piloté en force. Le chargement mécanique est appliqué à l'aide d'un vérin hydraulique sur la dalle, la valeur de la charge de rupture et la flèche verticale, sous la surface d'application de la charge est relevé automatiquement, pour chaque incrément de charge. La vitesse de chargement est de 10N/s. Pour le besoin de l'essai, un dispositif d'appui rigide en acier, de forme rectangulaire, constitué de quatre côtés supposés infiniment rigides et vides au milieu afin de ne pas gêner le fléchissement de la dalle sous chargement, est confectionné. La dalle est donc simplement appuyée sur les quatre côtés. La Figure IV.1 illustre le mode d'essai et le dispositif d'appui. L'essai est conduit jusqu'à la rupture totale de la dalle.



Figure IV.1 Vue du dispositif d'essais.

IV.1.3. Présentation des différents essais

La caractérisation expérimentale du comportement sous poinçonnement a porté sur plusieurs dalles une moyenne de (48) dalles a été réalisée en béton renforcé par des fibres métalliques ondulées (copeaux) et de fibres en grilles de polypropylène. Tous les paramètres, régissant le comportement global sont identifiés ainsi que leurs influences sur le mode de rupture sont présentées et analysées. Des séries de dalles ont été considérées : la première série d'essais (série 1), des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM), la deuxième série d'essais (série 2), des dalles renforcées par des fibres en grilles polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM), au poinçonnement centré, comme première partie.

Aussi, l'objectif visé consiste à étudier l'influence de l'excentricité de la charge appliquée par rapport au centre de la dalle (poinçonnement excentré) suivant l'axe xx' , sur la réponse mécanique ainsi que le mode de rupture observé, en considérant la troisième (série 3) pour les fibres métalliques (FM) et la quatrième série (série 4) pour les fibres en grilles polypropylène, dans la deuxième partie.

IV.1.4. Première partie : Poinçonnement centré

Afin de suivre le comportement des dalles renforcées par des fibres au poinçonnement centré, deux séries d'essais ont été réalisées. La première série d'essais (série 1) portait sur des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM), tandis que la deuxième série d'essais (série 2) portait sur des dalles renforcées par des grilles en fibres de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et

de grandes mailles (GPP/GM). Un total de 24 dalles de dimensions [25x50x7]cm³ a été testé. Les essais ont été réalisés au laboratoire de Génie Civil sur une machine de type « IBERTEST ».

La Figure IV.2 illustre le principe de l'essai du poinçonnement centré.



Figure IV.2 Essai de poinçonnement centré.

IV.1.4.1. Première série d'essais (Série N°1)

Afin d'observer le comportement de dalles en béton renforcé de fibres métalliques (MF) en poinçonnement centré, 24 essais ont été réalisés sur des dalles de dimensions [25x50x7]cm³. Diverses teneurs en fibres ont été prises en compte pour cette série, W=0,2%, W=0,4%, W=0,6 %, W=0,8% et W=1%, ainsi qu'un échantillon de béton témoin noté BT (W=0 %). Les fibres métalliques étaient réparties de manière aléatoire au sein de la matrice cimentaire.

IV.1.4.2. Résultats et discussions

La Figure IV.3 montre un exemple de mode de rupture par poinçonnement centré de dalles renforcées de fibres métalliques MF (série 1).

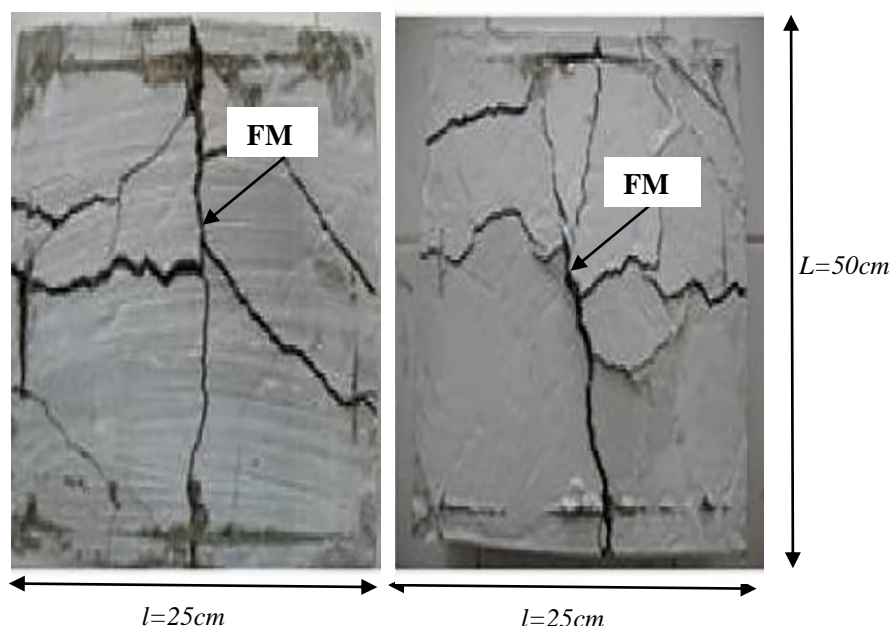


Figure IV.3 Exemple de mode de rupture de la série 1

La Figure IV.4 illustre la superposition des courbes résistances moyenne à mi-portée pour les dalles renforcées de fibres métalliques MF (série 1). Ces courbes représentent différentes teneurs en fibres, notamment $W = 0,2\%$, $W = 0,4\%$, $W = 0,6\%$, $W = 0,8\%$ et $W = 1\%$. De plus, les courbes d'un béton témoin BT ($W=0\%$), qui sert de référence, sont incluses à titre de comparaison.

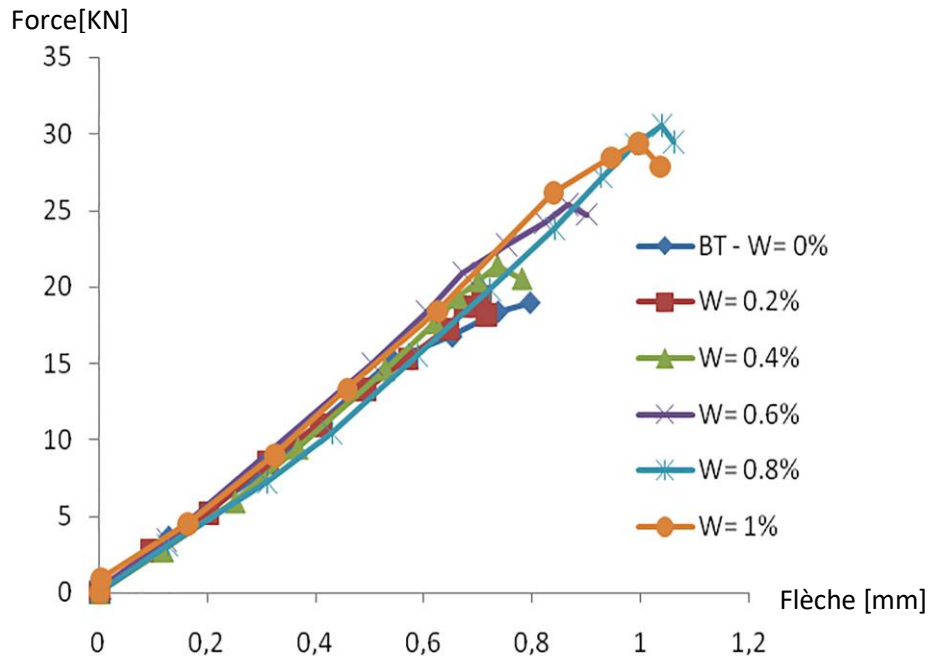


Figure IV.4 Superposition des courbes force-flèche pour les dalles de la série 1.

D'après les résultats de la première série d'essais (Figure IV.4) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche au poinçonnement centré des dalles renforcées de fibres métalliques (FM) testées, pour les teneurs en fibres, $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et $W=1\%$ et le BT ($W=0\%$)), ainsi que d'après le mode de rupture de ces dalles testées (Figure IV. 3) lors des d'essais de poinçonnement centré, on a constaté :

Que la résistance et la rigidité au poinçonnement centré des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ est meilleur que les dalles avec des teneurs en fibres $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$ et 1% et les dalles sans fibres BT ($W=0\%$).

Ces résultats de la première série (Figure IV.4) nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r=29,48\text{kN}$) est augmenté d'environ 55,56%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=18,95\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 33,33%.

Le Tableau IV.1 résume les forces (charges) et les déformations (flèches) à la rupture au poinçonnement centré des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) testées (série 1) pour les différents teneurs en fibres ($W=0,2\%$ et $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et $W=1\%$) et le béton témoin BT (sans fibres).

La teneur en fibres (%)	BT	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1%
Force à la rupture (kN)	18,95	18,20	20,50	24,73	29,48	27,89
Déformation flèche [mm]	0,795	0,716	0,780	0,900	1,060	1,035

Tableau IV.1 Forces et les déformations à la rupture au poinçonnement centré des dalles

IV.1.4.3. Deuxième série d'essais (Série N°2)

L'objectif principal de la deuxième série de tests (série 2) est de mener des expériences visant à observer le comportement de poinçonnement centré des dalles de béton renforcées avec des treillis de fibres de polypropylène. Pour mettre en évidence l'impact des dimensions du maillage sur la capacité portante de la dalle renforcée, ainsi que sur le mode de rupture, deux types de maillages ont été examinés dans cette étude : les petits maillages (PPG/SM) et les grands maillages (PPG/LM). La disposition des treillis de fibres de polypropylène pour les deux variantes, GPP/SM et GPP/LM, s'étendant sur toute la hauteur de la dalle, est représentée dans les Figures IV.5 et IV.6, respectivement.

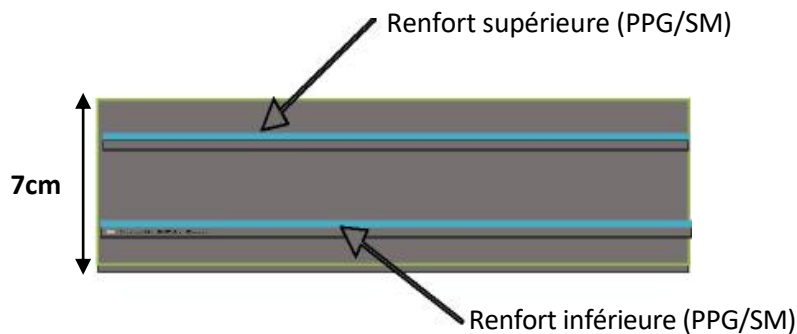


Figure IV.5 Disposition des petits maillages.

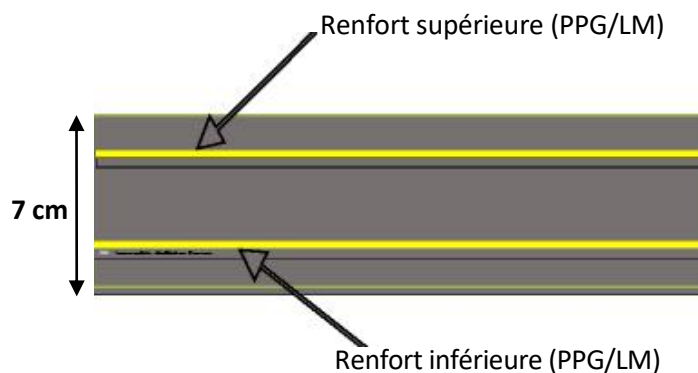


Figure IV.6. Disposition des grands maillages.

IV.1.4.4. Résultats et discussions

La Figure IV.7 montre un exemple du mode de rupture des dalles renforcées de fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) (série 2) testées lors d'essais de poinçonnement centré.

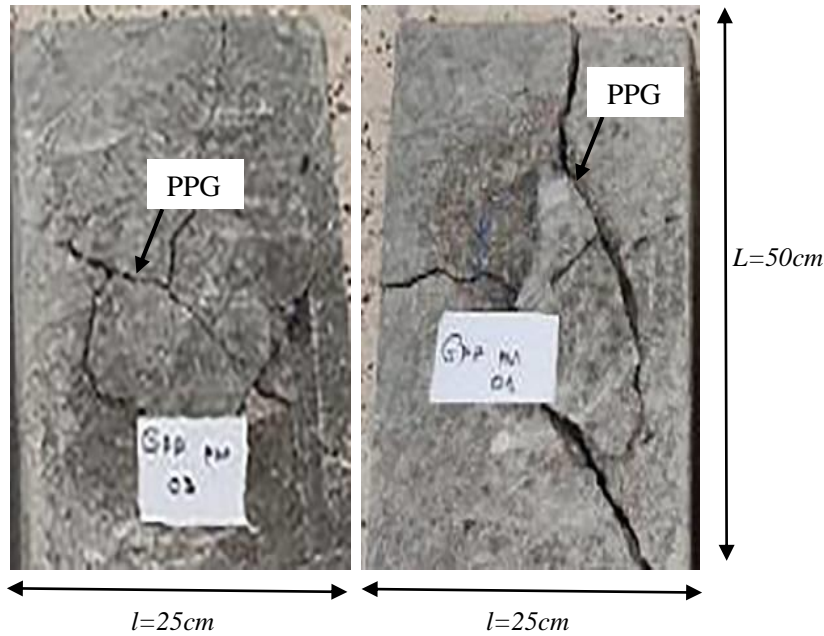


Figure IV.7 Exemple de mode de rupture de la série 2

La Figure IV.8 illustre la superposition des courbes moyennes de la force-flèche au poinçonnement centré pour les fibres en grilles de polypropylène (GPP/PM) et (GPP/GM), ainsi que pour le béton témoin BT (sans fibres).

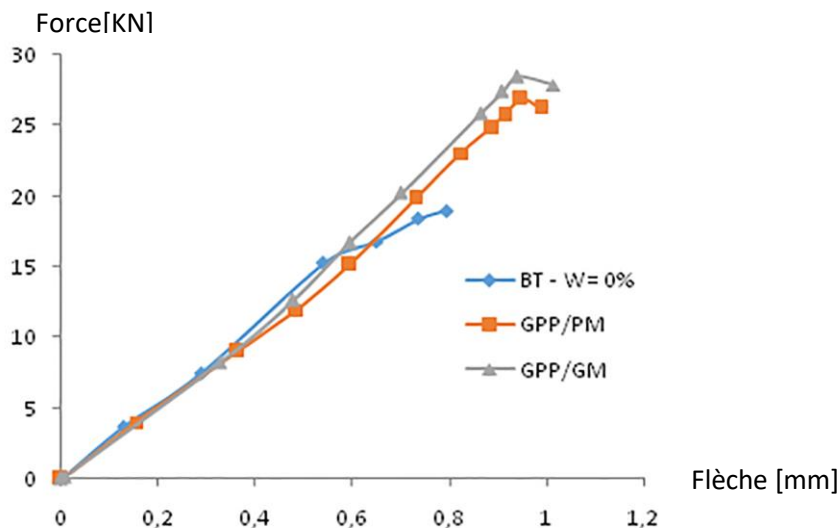


Figure IV.8 Superposition de force-flèche courbes pour fibres de mailles polypropylènes(séries 2).

D’après les résultats de la deuxième série d’essais (Figure IV.8) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche des dalles renforcées par des fibres en grilles

polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et grande maille (GPP/GM) testées ainsi que BT (sans fibres), le mode de rupture pour les deux grilles est une rupture par poinçonnement (Figure IV.7).

Les courbes obtenues (Figure IV.8), montrent que la résistance et la rigidité au poinçonnement centré des dalles renforcées avec des fibres en grilles de polypropylène de grande maille (GPP/GM) et meilleur que les dalles renforcées avec des grilles polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et les dalles sans fibres (W=0%).

Ces résultats de la deuxième série (Figure V.8) nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des fibres en grilles de polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=27,84\text{kN}$) est augmenté d'environ 46,91%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=18,95\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 27,54%.

Le Tableau IV.2 résume les forces (charges) et les déformations (flèches) à la rupture au poinçonnement centré des dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) testées (série 2), ainsi que le béton témoin BT (W=0%).

Teneurs en fibres (%)	BT (W= 0%)	GPP/PM	GPP/GM
Forces à la rupture (kN)	18,95	26,20	27,84
Déformations flèches [mm]	0,795	0,989	1,014

Tableau. IV. 2 Forces et les déformations à la rupture au poinçonnement centré des dalles testées (série2).

La Figure IV.9 illustre la superposition des meilleures courbes obtenues par poinçonnement centré des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) (série 1) et des dalles renforcées par des fibres en grilles polypropylène grandes mailles (GPP/GM) (série 2), ainsi que du béton témoin (BT) (W=0%).

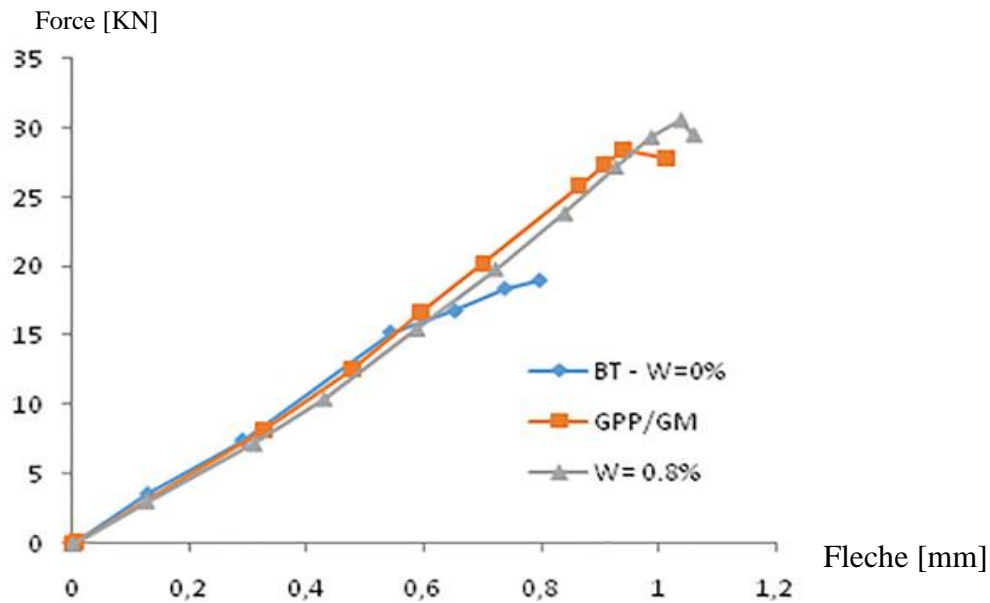


Figure IV.9 Superposition de la meilleure résistance-flèche courbes de dalles renforcées avec des fibres de grille en Polypropylène et de fibres métallique.

D'après la Figure IV.9, on a constaté que la résistance et la rigidité au poinçonnement centré des dalles renforcées avec des fibres métalliques (FM) ayant une teneur en fibres de $W=0,8\%$ sont meilleures que celles des dalles renforcées avec des fibres en grilles en polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM). On observe également une augmentation d'environ 55,56% de l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ par rapport aux dalles sans fibres, tandis que la déformation (flèche) augmente d'environ 33,33%. L'effort de rupture des dalles renforcées avec des fibres en grilles depolypropylène de grande maille (GPP/GM) augmente d'environ 46,91%, tandis que la déformation (flèche) augmente d'environ 27,54%.

IV.1.4.5. Conclusion

Les essais réalisés sur des dalles renforcées de fibres métalliques (FM) (série 1) et les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et à grandes mailles (GPP/GM) (série 2) ont été effectués pour étudier leur comportement au poinçonnement centré. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres métalliques (FM) avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ améliore la résistance et la rigidité par rapport aux autres teneurs, ainsi qu'au béton témoin BT (sans fibres). Les résultats de la première série (série 1) nous ont également permis de constater que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ ($F_r = 29,48\text{kN}$) augmente d'environ 55,56% par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r = 18,95\text{kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 33,33%. Pour ce qui est de la deuxième série (série 2), l'effort de rupture des dalles renforcées avec des fibres en grilles de

polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) ($F_r = 27,84\text{kN}$) augmente d'environ 46.91% par rapport aux dalles sans fibres ($W=0\%$) ($F_r = 18,95\text{kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 27,54%.

La comparaison des résultats obtenus au poinçonnement centré sur des dalles renforcées avec des fibres de métal (FM), ainsi que sur des dalles renforcées avec des grilles en polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM), montre clairement (d'après la figure IV.7) que la résistance et la rigidité au poinçonnement des dalles renforcées avec des fibres de métal (FM) pour une teneur en fibres de $W=0,8\%$ sont meilleures que celles des dalles renforcées avec des grilles en polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM).

IV.1.5. Deuxième partie : Poinçonnement excentré

On parle du poinçonnement excentré lorsque la dalle transmet une charge verticale et un moment de flexion à la colonne, l'effet combiné de la charge verticale et du moment peut être remplacé par une charge excentrée par rapport à l'axe de la colonne. Pour pouvoir étudier ce cas de chargement et comme les moyens d'effectuer les essais sur des dalles à grande échelle au laboratoire n'est pas disponible, cette excentricité est réalisée par le placement de la pièce servant de poinçon sur la dalle et la force d'excentrement a été effectuée suivant l'axe (x-x) d'un rapport $L/6$ (Figure IV.10).

L'objectif visé consiste à étudier le comportement des dalles renforcées par des fibres métalliques ondulées (copeaux) et de fibres en grilles de polypropylène de deux mailles (GPP/PM) et (GPP/GM) sous un chargement excentré et d'évaluer l'effet de la variation de l'excentricité sur la charge ultime et le mode de rupture.

Deux séries de tests ont été réalisées pour le chargement en poinçonnement excentré, la série 3 pour les fibres Métalliques (FM) et la série 4 pour les fibres en grilles de polypropylène.

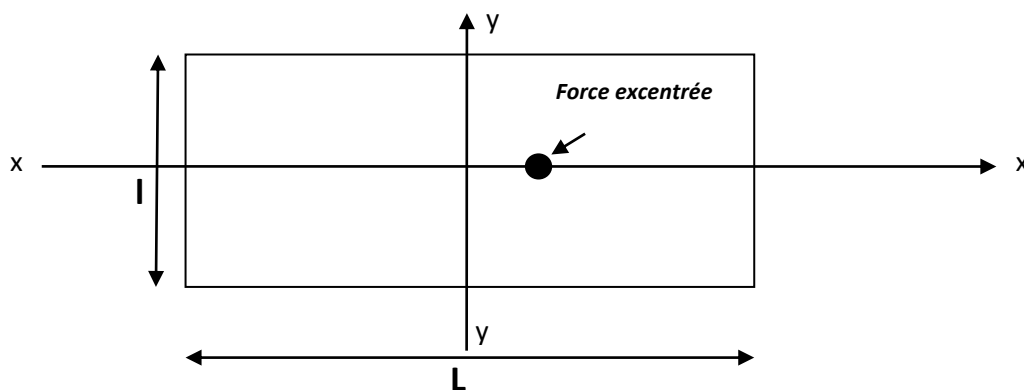


Figure IV.10 Position de la force excentrée suivant (x-x).

IV.1.5.1. Troisième série d'essais (Série N°3)

On a considéré 24 dalles de mêmes dimensions [25x50x7] cm³. Les teneurs en fibres de cette série étaient de $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$ et 1% . Trois (03) dalles en béton non renforcées considérées comme des dalles de référence (BT), sont également réalisées pour la confrontation des résultats.

La figure IV.11 présente un exemple lors de d'essai en poinçonnement excentré



Figure IV.11 Exemple de l'essai de poinçonnement excentré.

IV.1.5.2. Résultats et discussions

La Figure IV.12 montre un exemple du mode de rupture au poinçonnement excentré des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) de la série N°03.



Figure IV.12 Modes de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques sous un chargement de poinçonnement excentré

La représentation de la force-flèche pour les différents teneurs en fibres ($W=0,2\%$ et $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$, $W=1\%$) et béton témoin BT (sans fibres), est illustrée dans la Figure IV.13.

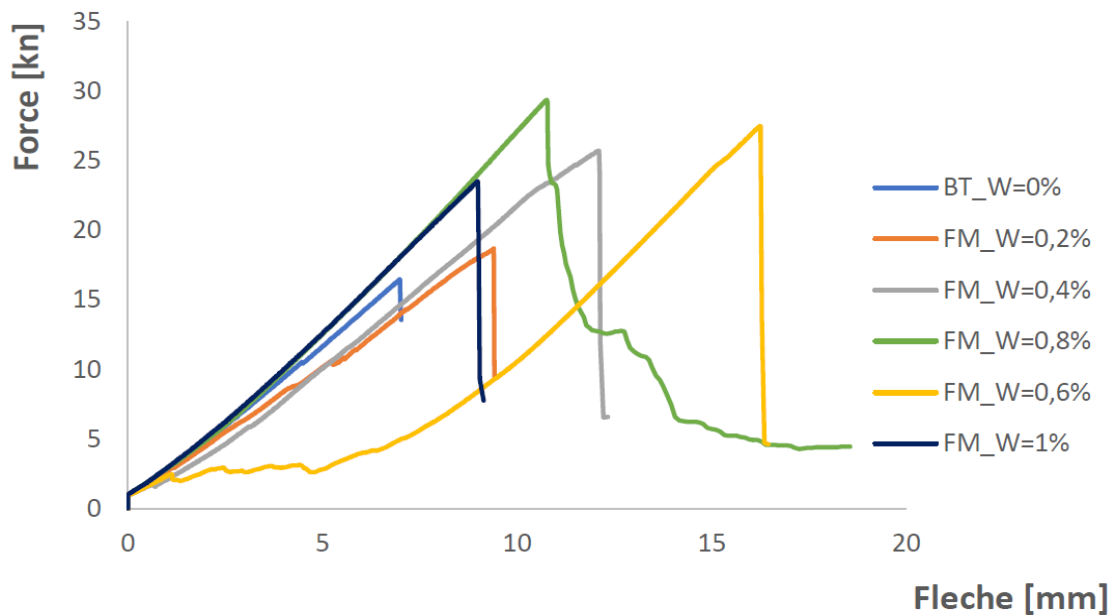


Figure. IV.13 Superposition des courbes force-flèche pour les différents teneurs en fibres métalliques au poinçonnement excentré (série N°03).

Les résultats de la troisième série d'essais (figure IV.13) qui présentent la superposition des courbes moyennes force-flèche des dalles renforcées de fibres Métalliques de récupération FM testées de teneurs en fibres, $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=0,8\%$, $W=1\%$ et le BT (sans fibres), on a constaté que :

Les courbes obtenues (figure IV.13), montrent que le comportement des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) pour les teneurs en fibres $W=0,2\%$, $W=0,4\%$, $W=0,6\%$, $W=1\%$ et ainsi que le béton témoin BT (sans fibres) ont une rupture fragile, par contre les dalles avec des teneurs en fibres $W=0,8\%$ ont une rupture ductile. Ça s'explique par les nombres importants des fibres traversant les deux bords de la dalle (voir le mode de rupture de la (Figure IV.12)).

Le Tableau IV.3 résume le nombre de fibres traversant les deux bords de la dalle pour chaque pourcentage en fibres :

Teneurs en fibres (%)	BT $W=(0\%)$	$W=0,2\%$	$W=0,4\%$	$W=0,6\%$	$W=0,8\%$	$W=1\%$
Nombre de fibres traversant les deux bords de la dalle	/	[8-9]	[18-20]	[26-29]	[37-40]	[38-39]

Tableau IV. 3 Le nombre de fibres traversant les deux bords de la dalle pour chaque pourcentage en fibres.

Les différents résultats obtenus en matière de capacité portante, des différentes dalles considérées sont récapitulées dans le Tableau IV.4.

Teneurs en fibres (%)	BT W= (0%)	W=0,2%	W=0,4%	W=0,6%	W=0,8%	W=1%
Force à la rupture (kN)	17,38	19,68	25,73	27,50	30,13	23,53

Tableau IV. 4 Résistance à la rupture au poinçonnement excentré des dalles testées(Série N°03).

Ces résultats obtenus montrent, aussi, que l'ajout des fibres avec des teneurs $W=0,8\%$ confère une ductilité significative par rapport au béton témoin BT (sans fibres). D'autre part le comportement du béton de fibres en poinçonnement excentré, 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 dalle, 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 V.10) ce qui permet d'éviter une rupture brutale.

Les résultats de la série N°03 (Figure IV.13) nous ont permis de noter que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r=30,13\text{kN}$) est augmenté d'environ 42%, par rapport aux dalles sans fibres ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 39%.

IV.1.5.3. Quatrième série (Série N°4)

On considère les mêmes types de mailles qu'ont été pris dans le cas du poinçonnement centré c.-à-d. des grilles en fibres de polypropylène, les petites mailles (GPP/PM) et les grandes mailles (GPP/GM), et trois (03) dalles en béton non renforcées considérées comme des dalles de référence (BT), sont également réalisées pour la confrontation des résultats.

La Figure IV.14 et la Figure. IV.15, montre les exemples du mode de rupture des dalles renforcées de fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et de grandes mailles (GPP/GM) (série N°04) testées lors d'essais de poinçonnement excentré.

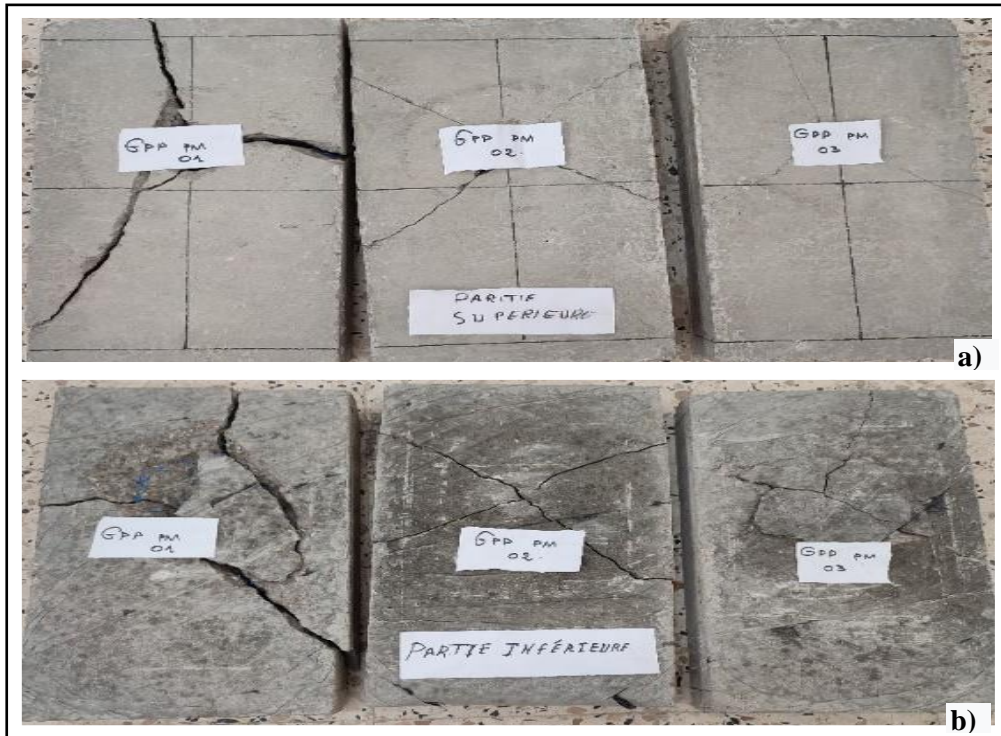


Figure IV.14 a) mode de rupture sur les parties supérieures, b) mode de rupture sur les parties inférieures des dalles renforcées avec des fibres en polypropylènes de petites mailles. (GPP/PM).

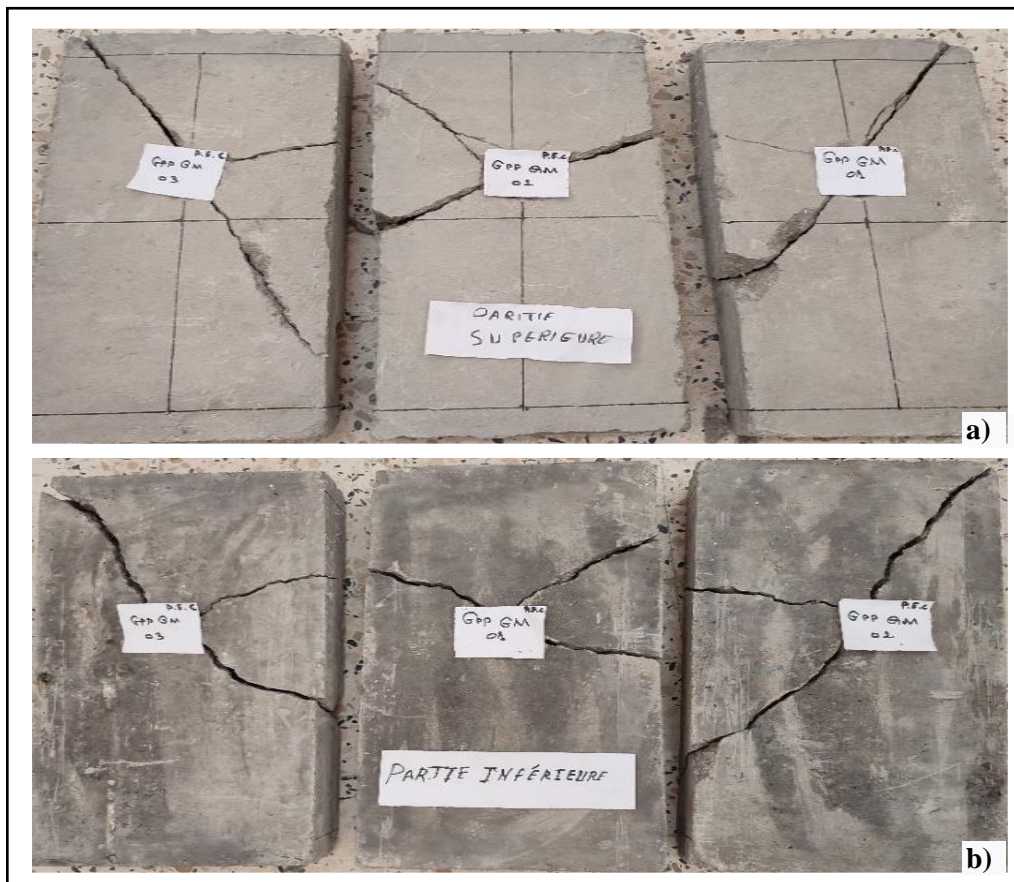


Figure. IV.15 a) mode de rupture sur les parties supérieures, b) mode de rupture sur les parties inférieures des dalles renforcées avec des fibres en polypropylènes de grandes mailles. (GPP/GM).

IV.1.5.4. Résultats et discussions

Les différents résultats obtenus en matière de capacité portante, rupture, des différentes dalles considérées sont récapitulés dans le Tableau IV.5. La capacité portante de la dalle est identifiée par la valeur de la charge ultime, détectée lors de l'essai.

Teneurs en fibres (%)	BT (W= 0%)	GPP/PM	GPP/GM
Force à la rupture (kN)	17,38	29,12	29,57

Tableau. IV. 5 Résistance à la rupture au poinçonnement excentré des dalles testées (série N°04).

La Figure IV.16 illustre la superposition des courbes force-flèche pour les deux grilles en polypropylène (GPP/PM) et (GPP/GM), ainsi qu' et le béton témoin BT (sans fibres).

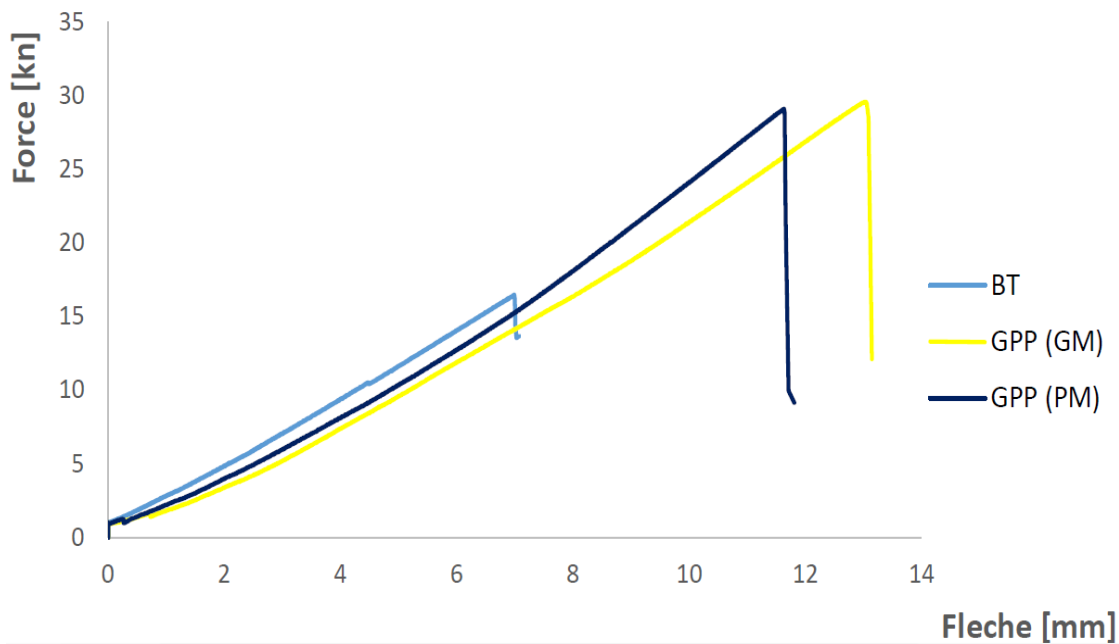


Figure IV.16 Superposition des courbes force-flèche des dalles renforcées par des grilles polypropylène au poinçonnement excentré (série N°04).

Les résultats de la quatrième série d'essais (Figure IV.16), la superposition des courbes moyennes force-flèche des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) testées ainsi que BT (sans fibres), le mode de rupture pour les deux grilles est une rupture fragile (Voir les Figures IV.14 et IV. 15).

Les courbes obtenues, montrent que la résistance et la rigidité en poinçonnement excentré des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) et meilleur que des grilles polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et les dalles sans fibres (BT).

Aussi, nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=29,57\text{kN}$) est augmenté d'environ 41%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 45%.

La superposition de meilleures courbes obtenues en poinçonnement excentré (la figure IV.17) illustre la superposition de meilleures courbes obtenues en poinçonnement excentré par les dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) (série N°03) et les dalles renforcées par des fibres en grilles polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) et des (série N°04), ainsi que le béton témoin BT (sana fibres).

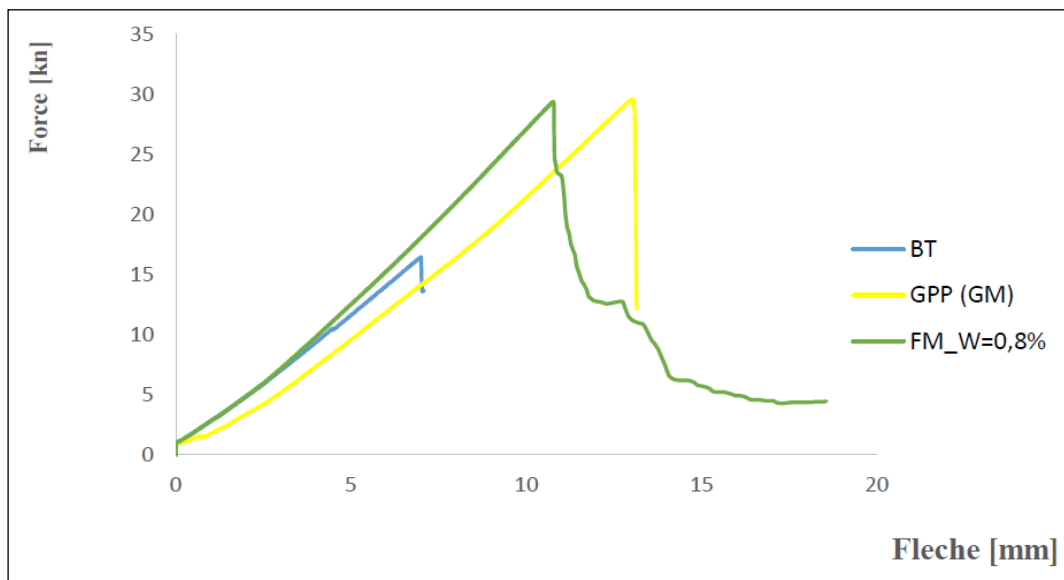


Figure IV.17 Superposition des meilleurs courbes force-flèche des dalles renforcées par des grilles en polypropylène, des es fibres métalliques et de béton témoin.

Sur la Figure IV.17, on constate bien que la résistance et la rigidité en poinçonnement excentré des dalles renforcées avec des fibres métalliques (FM) avec une teneur en fibre $W=0,8\%$ soient meilleures que les dalles renforcées avec des grilles en propylènes de petites mailles (GPP/PM) et des grilles en propylène de Grandes mailles (GPP/GM). On constate aussi que le mode de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) à un comportement ductile après fissuration du béton, par contre les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petite et grande maille ont un comportement fragile après fissuration du béton.

IV.1.5.5. Conclusion

Cette partie d'étude expérimentale a été menée dans le but de saisir et de comprendre l'impact ou les effets que peut avoir l'introduction de fibres métalliques (FM) dispersées aléatoirement dans la matrice cimentaire, ainsi que les fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et à grandes mailles (GPP/GM), sur le comportement au poinçonnement centré et excentré des dalles en béton renforcées par les deux types de fibres.

Les essais réalisés sur les dalles renforcées de fibres métalliques (FM) (série 1) et les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène à petites mailles (GPP/PM) et à grandes mailles (GPP/GM) (série 2) ont été effectués pour étudier leur comportement au poinçonnement. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres métalliques (FM) avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ améliore la résistance et la rigidité par rapport aux autres teneurs, ainsi qu'au béton témoin BT (sans fibres). Les résultats de la première série (série 1) nous ont également permis de constater que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ ($F_r = 29,48\text{kN}$) augmente d'environ 55,56% par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r = 18,95\text{kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 33,33%. Pour ce qui est de la deuxième série (série 2), l'effort de rupture des dalles renforcées avec des fibres en grilles de polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) ($F_r = 27,84\text{kN}$) augmente d'environ 46,91% par rapport aux dalles sans fibres ($W=0\%$) ($F_r = 18,95\text{kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 27,54%.

Les résultats de la série N°03 (Figure IV.13) nous ont permis de noter que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r= 30,13\text{kN}$) est augmenté d'environ 42%, par rapport aux dalles sans fibres ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 39%.

Les résultats de la série N°04 ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=29,57\text{kN}$) est augmenté d'environ 41%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 45%.

Cette étude nous a permis de constater aussi que le mode de rupture des dalles renforcées par des fibres métalliques (FM) a un comportement ductile après fissuration du béton, par contre les dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petite et grande maille ont un comportement fragile après fissuration du béton.

IV.2. Effet de la température élevée sur le comportement du béton renforcé par des fibres de récupération

IV.2.1. Introduction

Le but principal de cette étude expérimentale est de suivre le comportement en compression et en flexion du béton renforcé de fibres métalliques (BFM) et du béton renforcé de fibres de polypropylène (BFPP) sous une haute température (600°C et 800°C) et l'impact de l'évolution de la température sur leurs propriétés mécaniques. Nous évaluons ces changements en mesurant la perte de masse résiduelle ainsi que la résistance résiduelle à la compression et à la flexion. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons deux teneurs optimales en compression (W=0,2%) et en flexion (W=0,8%), ainsi qu'un béton témoin (BT) servant de référence sans fibres (W=0%). Le béton renforcé de fibres métalliques, le béton renforcé de fibres de polypropylène et le béton sans fibres (W=0%) sont soumis à divers cycles de chauffage-refroidissement jusqu'à des températures maximales de 600°C et 800°C à l'âge de 28 jours.

IV. 2.2. Propriétés et dimensions des fibres utilisées

L'aspect des fibres utilisées, l'ancrage des extrémités des fibres métalliques et les propriétés mécaniques et géométriques des fibres utilisées sont illustrés respectivement sur la Figure IV. 18, Tableau IV.6 et le Tableau IV .7.

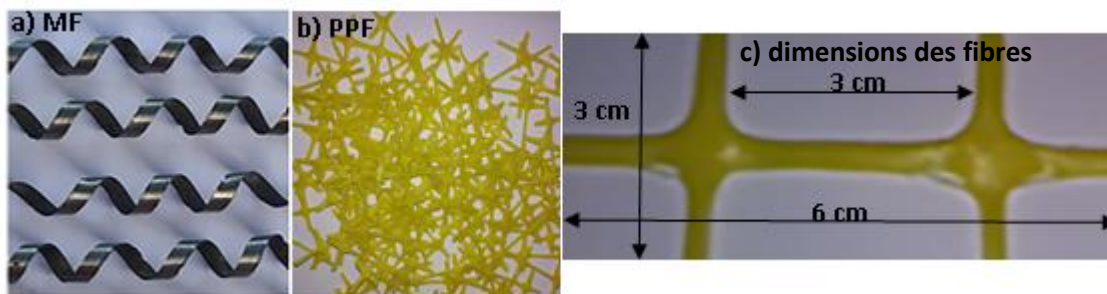


Figure IV. 18 Vue des fibres: a) fibres métalliques (FM); b) fibres de polypropylène; c) dimensions des fibres polypropylène

Types de fibres	L (cm)	l (cm)	e _p (cm)	Φ (cm)	σ _e (MPa)	γ (g/cm ³)
Fibres métalliques	6	0,02	0,06	0,8	275	7,87
Fibres polypropylenes	6	0,3	0,3	/	16,92	0,95

Tableau IV.6 Caractéristiques des propriétés mécaniques des fibres utilisées.

Fractions volumiques des fibres W (%)	fibres métalliques	Polypropylène fibres
Poids pour 1m ³ de béton (kg)	7 870	950

Tableau IV.7 Masse de différents contenus de fibres pour 1m³ de béton.

IV.2.3. Confection des éprouvettes

Le gâchage comme le malaxage (Figure IV. 19) sont des opérations délicates. Il faudrait, d'une part, s'assurer d'une qualité d'enrobage acceptable, une bonne dispersion des fibres et d'autre part, éviter la ségrégation des granulats. La durée du malaxage et la vitesse de malaxage sont des facteurs primordiaux dans l'homogénéité du mélange. De plus, l'ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur peut éventuellement influencer les caractéristiques du béton.

Tous les mélanges ont été gâchés en suivant le même protocole, le béton a été réalisé dans un malaxeur à axe vertical. Pour chaque gâchée, le malaxage du béton se fait comme suit :

- Malaxage pendant 2 min ;
- Déversement du sable, du gravier et du ciment dans le malaxeur et on mise en marche pendant 1min jusqu'à homogénéisation des matériaux ;
- Introduction de l'eau de gâchage et super-plastifiant et malaxage pendant 2min.



Figure IV. 19 Malaxage de béton.

IV.2. 4. Réalisation du béton de fibres métallique

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés. Le béton fibré est l'un de ces matériaux.

L'incorporation des fibres se fait au malaxage des granulats (voir Figure IV.20). Le mélange se fait à l'état demi-sec, les fibres sont incorporées une par une. Le malaxage se fait comme suit :

1. Déversement du sable, du gravier et du ciment dans le malaxeur et on mise en marche pendant 1mn environ jusqu'à homogénéisation ;
2. Introduire les fibres aléatoirement, bien malaxé jusqu'à homogénéisation ;
3. Introduction de l'eau de gâchage et super-plastifiant et malaxage pendant 2 min ;
4. L'introduction des fibres se fait dans cette dernière phase, qui permet d'assurer une meilleure dispersion des fibres dans le béton et une bonne homogénéisation du mélange.

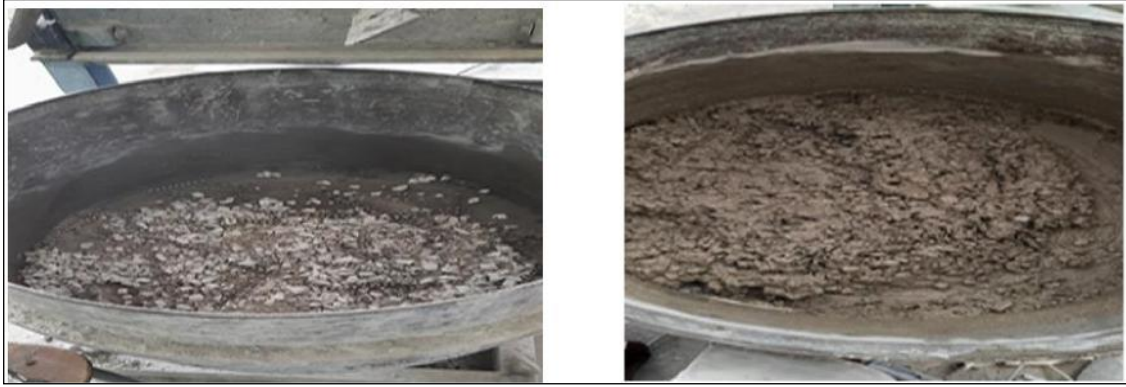


Figure IV. 20 Malaxage du béton de fibres.

IV.2. 5. Conservation des éprouvettes

Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulées et conservées dans un bac à eau pendant 28 jours. Après cette cure toutes les éprouvettes ont été stockées dans la salle du laboratoire pour bien sécher jusqu'à la stabilisation de leurs masses. Les éprouvettes ainsi préparées seront soumises aux cycles thermiques (cycles chauffage-refroidissement).

IV.2.6. Essais thermiques

Chaque cycle (chauffage-refroidissement) est composé de trois phases (Figure IV.21). La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. La seconde est un palier de température constante dans le four afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes. Elle dure quatre heures de temps. La dernière phase est une diminution de la température jusqu'à atteindre la valeur ambiante à la vitesse moyenne de $-1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. Cette phase de refroidissement des éprouvettes n'est pas pilotée. Elle se fait de façon naturelle en fonction de la température à l'intérieur du four qui est maintenu fermé. On souhaite en effet s'assurer que l'endommagement induit dans le béton résulte seulement de l'effet de la température.

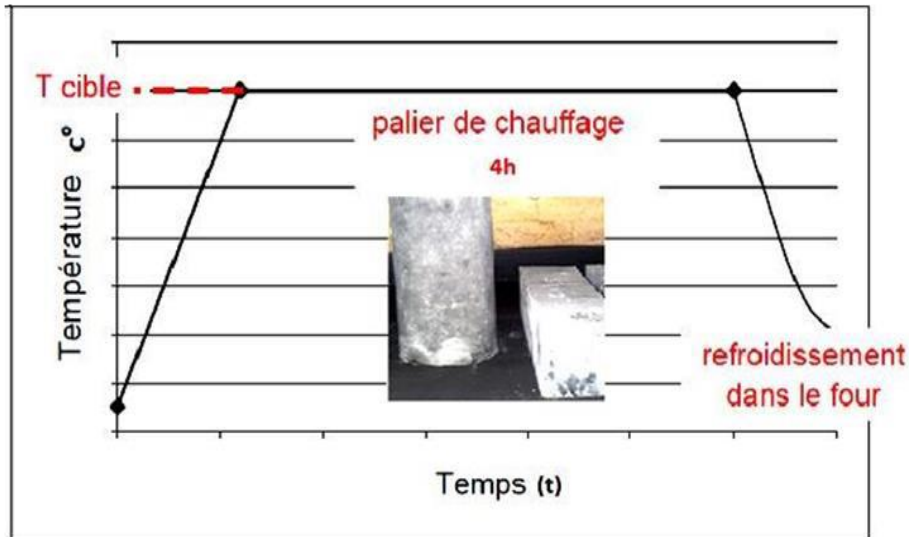


Figure V.21 Cycle de chauffage-refroidissement imposés aux éprouvettes.

Les éprouvettes sont disposées dans le four de façon à ce que la chaleur se répartisse d'une manière homogène. Cette répartition de chaleur est faite grâce au système de ventilation du four. Le pilotage du four est réalisé à l'aide d'un régulateur programmeur auquel sont reliés les thermocouples (Figure IV.22).



Figure IV.22 Disposition des éprouvettes à l'intérieur du four.

IV.2. 7. Calcul des pertes de masse

Pour la détermination de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Les éprouvettes issues du chauffage sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant. L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière (ou de masse) qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant

le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue par la formule (IV.1) suivante :

$$\text{Perte de Masse} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \dots\dots\dots(IV.2)$$

Avec :

M_0 : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage) ;

M_t : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement. Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0,1g.

IV.2. 8.Essais de compression

Les essais de compression sont réalisés sur une presse hydraulique de marque AUTOTEST d'une capacité maximale de 2000kN (Figure IV.23), sur cylindrique de 16cm de diamètre et 32cm de hauteur (selon la norme NF EN12390-4) comme illustré sur la Figure IV. 24.



Figure IV.23 Eprouvette cylindrique.



Figure IV. 24Presses hydrauliques.

IV.2. 8.1. Principe de l'essai

Dans le programme de compression des cylindres [16x32] cm²(Figure IV.23), le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique AUTO TEST avec une étendue de capacité 2000kN (Figure IV.24). Cette presse comporte 2 plateaux, un taux de chargement quasi statique est appliqué avec une vitesse de 0,5kN/s. A mi-hauteur au milieu de deux faces opposées, ont été mesurées, à intervalles rapprochés et les forces et les déformations axiales et radiales. Muni de mors auto-serrant, elle nous permet une bonne tenue des spécimens c'est une manière d'assurer une répartition homogène des contraintes. Les Figures ci-dessous illustrent le chargement et l'acquisition des résultats.

L'essai de compression est ainsi achevé. La force maximale F est donnée dès que la rupture est enclenchée. Cette force est enregistrée et la contrainte de rupture en compression est obtenue par

la formule suivante :
$$\sigma_c = \frac{4 \times F_{max}}{\pi D_2} \dots\dots\dots(IV. 3)$$

- F_{max} : désigne la charge à la rupture en compression ;
- D : diamètre de l'éprouvette.

IV.2.8.2. Calcul de la Pertes de masse en compression

La Figure IV.25 illustre l'histogramme de perte de masse en compression obtenue par la moyenne de trois essais effectués sur les éprouvettes cylindriques.

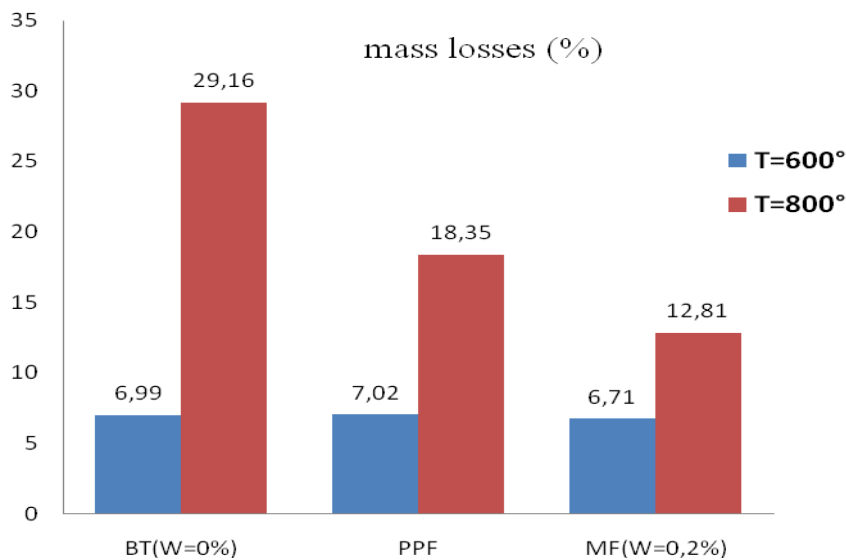


Figure IV. 25 Pertes de masse des différents bétons étudiés.

D'après l'histogramme de la Figure IV. 25, on observe que, plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. À 600°C, les différents bétons fibrés (BT, BFPP, BFM) ont présenté une perte de masse presque de même ampleur, tandis qu'à 800°C, c'est le béton témoin BT (W=0%) et le béton fibres polypropylène (BFPP) qui ont présenté une perte de masse assez importante.

IV.2. 8.3. Résistance à la compression

Le tableau IV.8 illustre l'aspect des éprouvettes cylindriques en béton témoin BT (W=0%), en béton de fibres de polypropylène (BFPP) et en béton de fibres métalliques (BFM) après avoir été exposées à des températures de 600°C et 800°C à la sortie du four.





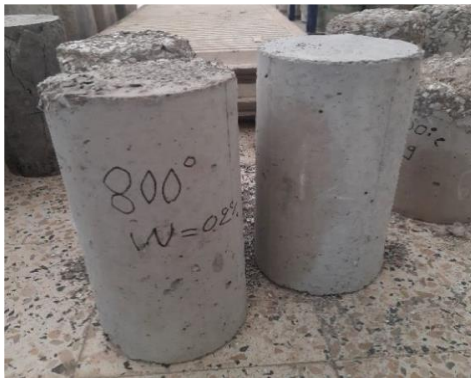

Température	Avant	Après
20°		
600°		
800°		

Tableau VI.8. L'aspect des éprouvettes du béton en fibres à la sortie du four.

En observant l'aspect des éprouvettes à la sortie du four, on constate l'apparition de fissures sous forme de faïençage dans le cas des bétons de fibres métalliques (BFM), des bétons de fibres de polypropylène (BFPP), ainsi que dans le cas du béton témoin (BT). De plus, le béton de fibres de polypropylène (BFPP) soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des cylindres.

Les Figures IV.26, IV.27 et IV.28 présentent respectivement la superposition des courbes moyennes contrainte-déformation en compression pour le béton témoin (BT), le béton de fibres polypropylène (BFPP) et le béton de fibres métalliques (BFM) aux températures de 20°C, 600°C et 800°C.

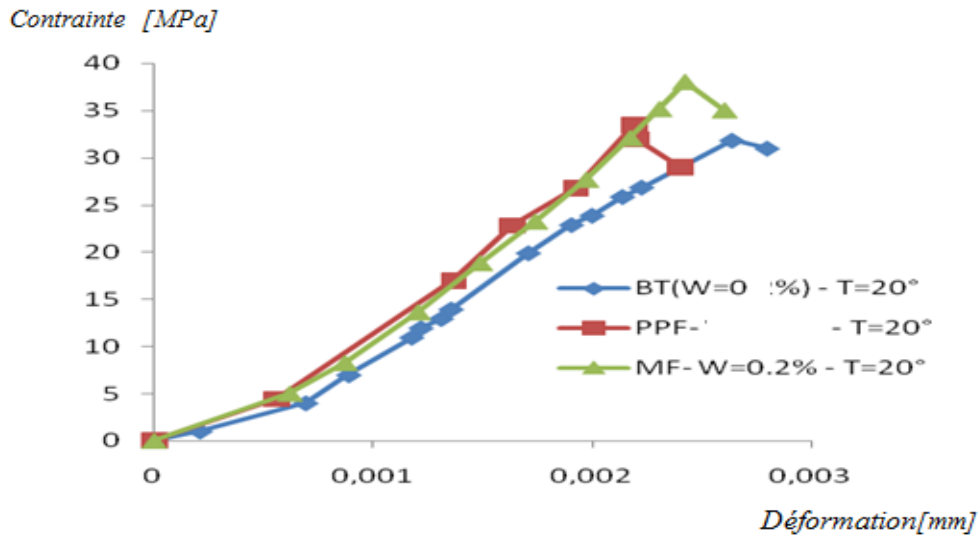


Figure IV. 26 Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=20°C.

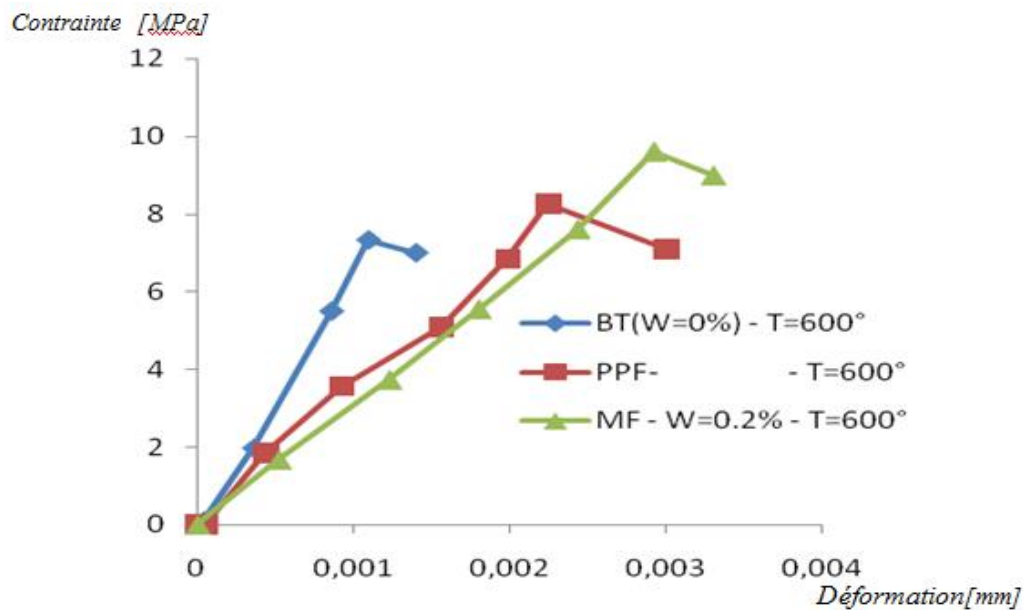


Figure IV. 27 Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=600°C.

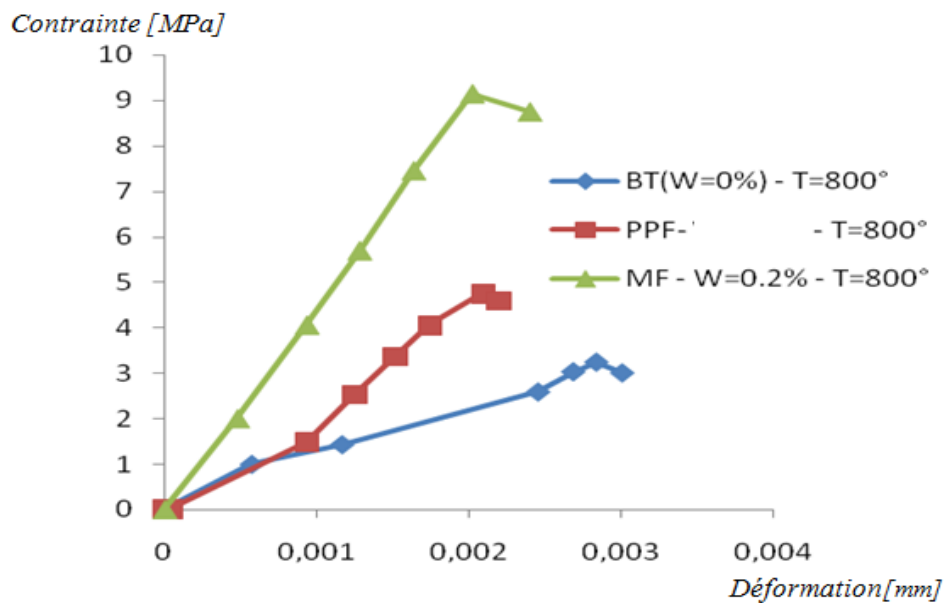


Figure IV.28 Courbe contrainte-déformation du béton étudié à T=800°C.

En présentant la contrainte-déformation en compression, pour tous les types de béton étudiés (BT, BFPP, BFM) soumis aux températures de 20°C, 600°C et 800°C, on constate que les bétons soumis à des cycles de chauffage-refroidissement aux températures de 600°C et 800°C ont présenté des résistances inférieures et une diminution de la pente des courbes contrainte-déformation par rapport aux bétons qui n'ont pas été soumis à de tels cycles de chauffage-refroidissement. Ce qui concerne les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons de fibres polypropylène (BFPP), une amélioration de la déformabilité a été observée.

La Figure IV. 29 illustre l'histogramme de la résistance à la compression des différents bétons étudiés (CC, CFM, CFPP) soumis à des températures de 20°C, 600°C et 800°C.

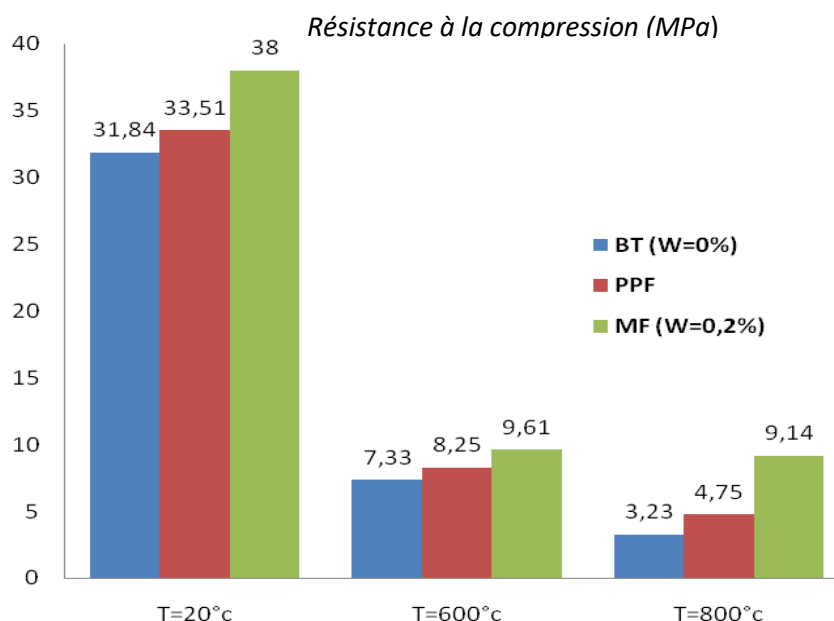


Figure IV.29 Résistance à la compression des différents bétons étudiés.

Sur la Figure IV 29, on remarque que tous les cas de températures considérées, la résistance de béton de fibres métalliques (BFM) est plus élevée par rapport aux bétons de fibres de polypropylène (BFPP) et au béton témoin BT (sans fibres), et la différence de température engendre une chute significative de la résistance sur l'ensemble des bétons utilisés.

À 800°C, une chute est d'environ 76% pour les bétons de fibres métalliques (BFM) et de 86% pour les bétons de fibres de polypropylène (BFPP) par rapport à ceux à 20°C.

IV.2. 9. Essais de flexion (flexion - 3points)

Des essais de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques [10x10x40] cm³, à l'aide de la machine "Ibertest", dans le but d'étudier le comportement mécanique du béton renforcé par des fibres métalliques (BFM) et des fibres de polypropylène (BFPP) à des températures élevées

(600°C et 800°C), avec une fraction volumique de fibres ($W=0,8\%$), ainsi que du béton témoin (BT) sans fibres ($W=0\%$). Au total, 27 poutres ont été testées.

La Figure IV. 30, présente le schéma statique de l'essai de flexion à trois points.

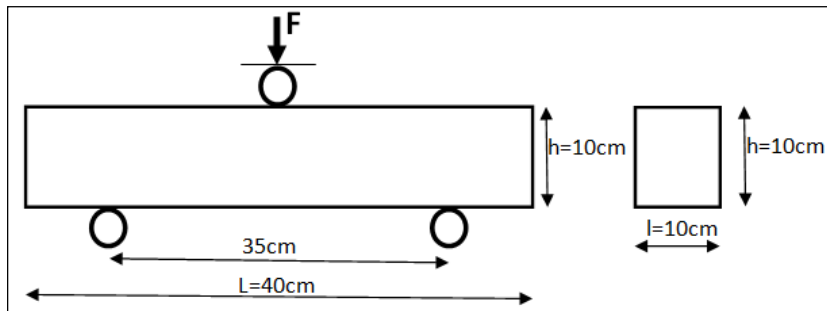


Figure IV. 30 Schéma statique de l'essai de flexion trois points.

VI.9.1. Géométrie et composition des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées pour réaliser des essais de flexion (flexion-3points) sont des éprouvettes prismatiques de dimensions $[10 \times 10 \times 40]$ cm³, avec une largeur (l) de 10cm, une hauteur (h) de 10cm et une longueur (L) de 40cm. Les moules prismatiques utilisés sont présentés dans la Figure IV.31. Les fibres métalliques (FM) et les fibres en polypropylène (FPP) sont disposées de manière aléatoire dans la matrice cimentaire. Un mélange vibré a été utilisé lors du coulage.



Figure. IV. 31 Moules prismatiques utilisés.

IV.2. 9.2. Principe de l'essai

Après le cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes de dimensions $[10 \times 10 \times 40]$ cm³ sont soumises jusqu'à rupture à un moment de flexion en appliquant une charge à l'aide d'un rouleau supérieur et de deux rouleaux inférieurs. Les éprouvettes sont soigneusement placées sur les deux rouleaux d'appuis inférieurs et centrés de manière à ce que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieur et inférieur) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette (voir Figure IV.32). Conformément à la norme NF EN ISO 527-2 [Afnor, 2001], le chargement est effectué à une

vitesse de 0,25mm/mn jusqu'à la rupture. La charge maximale ainsi que la courbe force-déformation est enregistrée au cours de l'essai.



Figure IV. 32 Dispositif de l'essai flexion 3 points.

IV.2.9.3. Résultats des essais flexion 3-points

Les Figures IV.33, IV. 34 et IV.35 illustrent des exemples du mode de rupture des poutres testées en béton témoin BT ($W=0\%$), en béton de fibres de polypropylène (BFPP) et en béton de fibres métalliques (BFM) après avoir été exposées à des températures de 20°C, 600°C et 800°C.

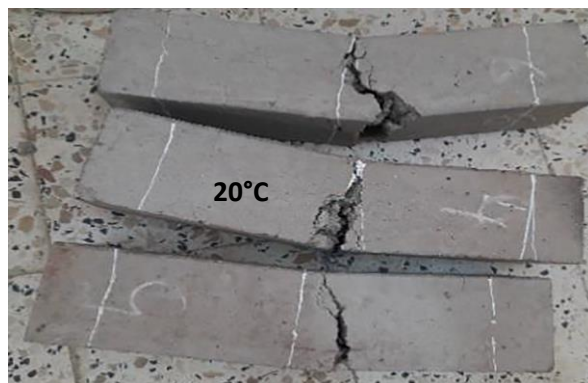


Figure IV.33 Exemple des poutres testées à 20°C.



Figure IV. 34 Exemple des poutres testées à 600°C.

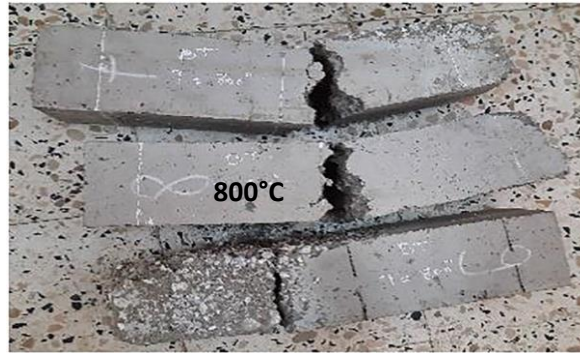


Figure IV. 35 Exemple des poutres testées à 800°C.

IV.2. 9.4. Calcul de la Pertes de masse en flexion

La Figure IV. 36 illustre l'histogramme de perte de masse en flexion obtenue par la moyenne de trois essais effectués sur les poutres prismatiques.

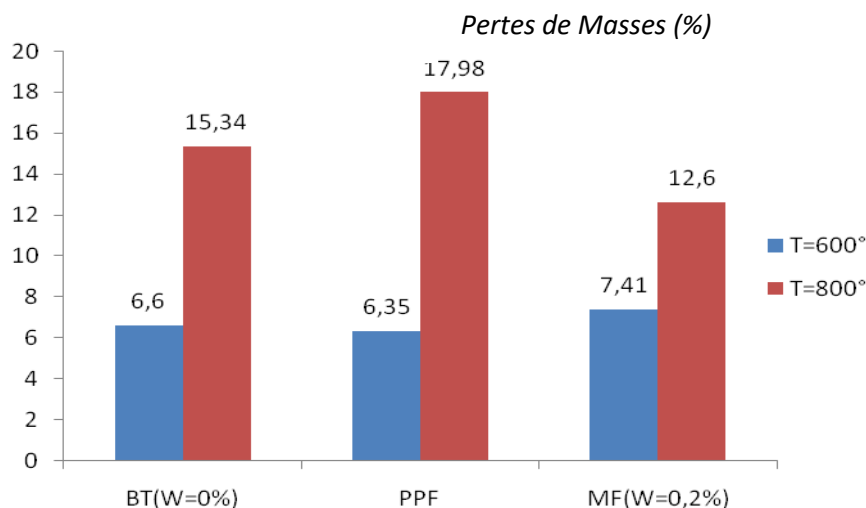


Figure IV. 36 Pertes de masse des différents bétons étudiés.

Selon l'histogramme de la Figure V. 36, il est observé que la perte de masse augmente proportionnellement à l'élévation de la température. À 600°C, les divers bétons fibrés (BT, BFPP, BFM) ont enregistré des pertes de masse similaires, tandis qu'à 800°C, le béton témoin BT (sans fibre) et le béton fibres polypropylènes (BFPP) ont subi des pertes de masse significatives.

IV.2. 9.5. Résistance à la flexion

Les Figures IV.37, IV.38 et IV.39 présentent respectivement la superposition des courbes moyennes de force-déformation en flexion pour le béton témoin BT (W=0%), le béton de fibres polypropylène (BFPP) et le béton de fibres métalliques (BFM) aux températures de 20°C, 600°C et 800°C.

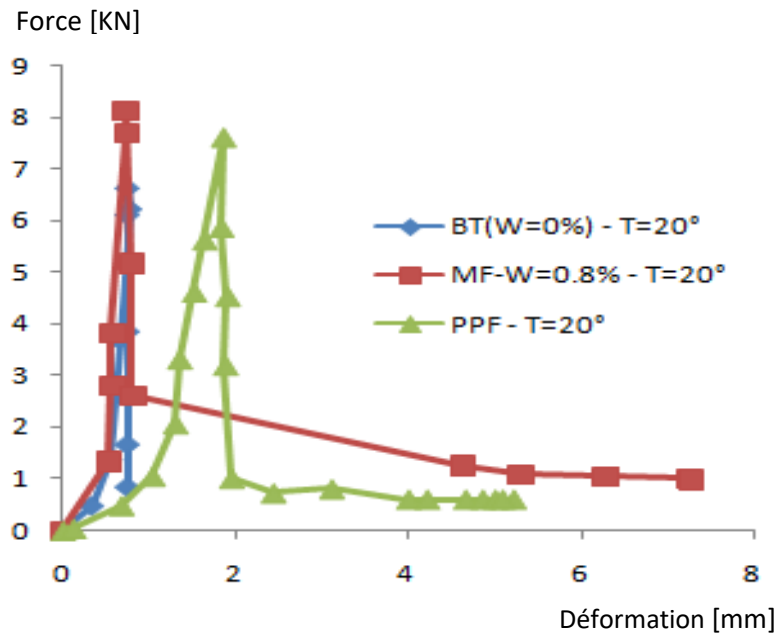


Figure IV. 37 Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 20°C.

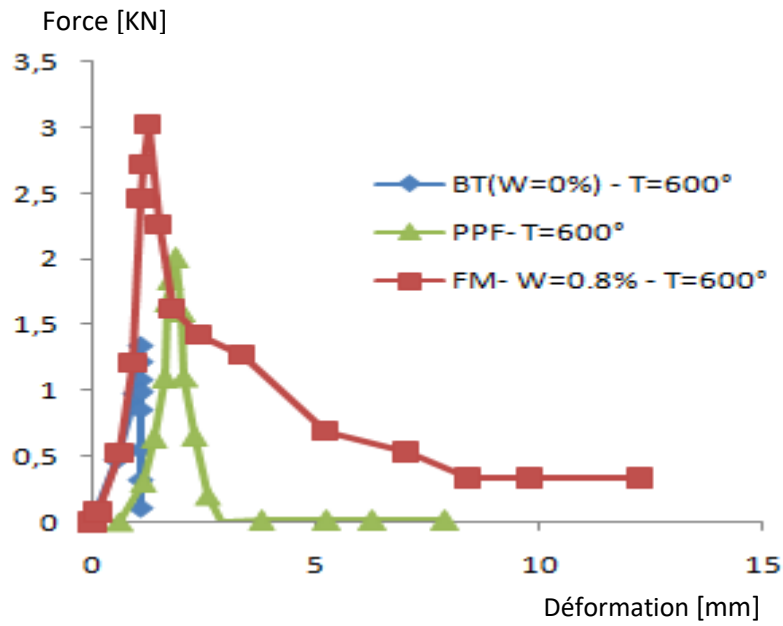


Figure IV. 38 Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 600°C.

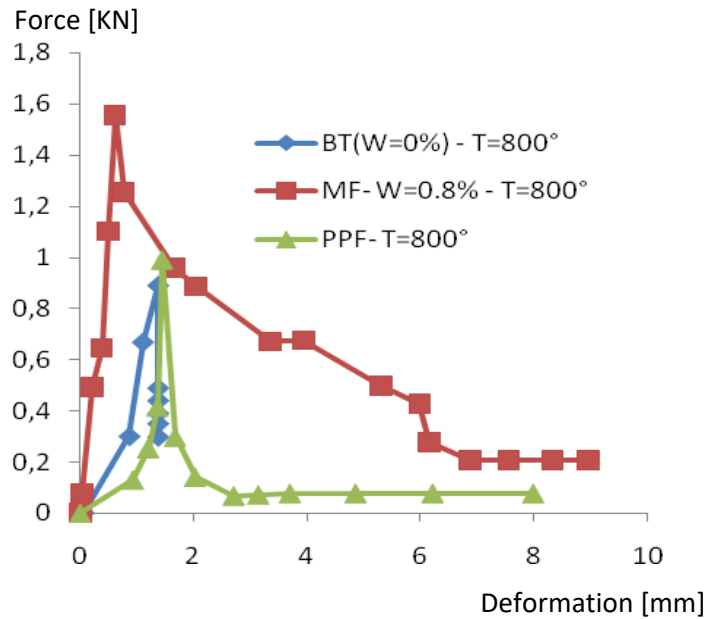


Figure IV. 39 Superposition de la force-déformation moyenne courbes des poutres testées à 800°C.

Les Figures IV.37, IV.38 et IV.39 illustrent la relation entre la force et la déformation (flèche) lors de la flexion des bétons fibrés. Elles révèlent que le comportement des bétons fibrés se divise en deux phases distinctes : une phase initiale linéaire correspondant à l'élasticité, suivie d'une phase post-fissuration où les fibres continuent à offrir de la résistance. Ces graphiques démontrent que le béton renforcé de fibres métalliques (BFM) affiche une meilleure performance en flexion à toutes les températures étudiées. Notamment, son comportement après le pic de résistance est supérieur à celui du béton sans fibre (BT, W=0%) et du béton renforcé par des fibres de polypropylène (BFPP). De plus, on a remarqué une chute significative de résistance pour tous les types de bétons (BT, BFPP, BFM) à une température de 800°C.

La Figure IV.40 illustre l'histogramme de la résistance à la compression des différents bétons étudiés (BT, BFM, BFPP) soumis à des températures de 20°C, 600°C et 800°C.

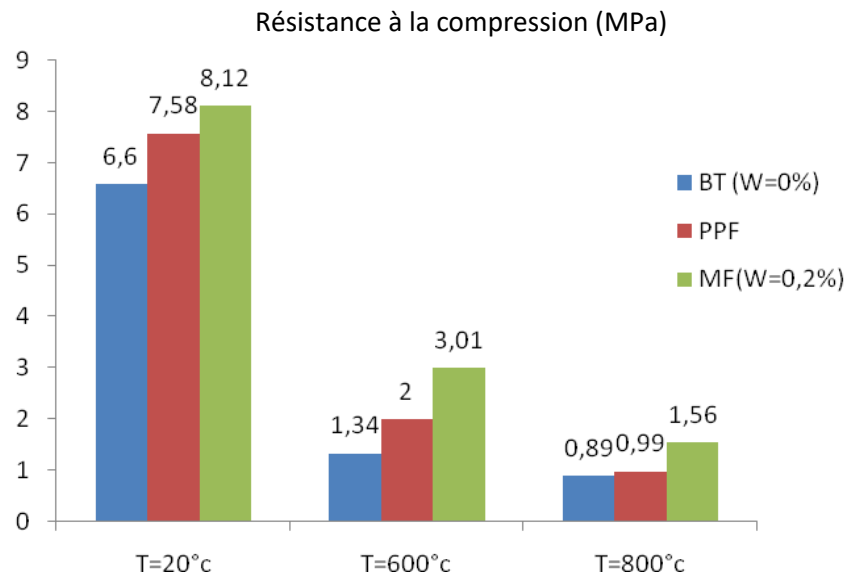


Figure IV. 40 Résistance à la compression des différents bétons étudiés.

Selon les données de la Figure IV 40, il est notable que le béton renforcé de fibres métalliques (BFM) affiche une résistance à la flexion supérieure par rapport aux bétons renforcés de fibres de polypropylène (BFPP) et au béton non renforcé (BT). À une température de 800°C, une baisse significative de la résistance est observée pour les bétons (BFM et BFPP) par rapport à celle à 20°C. Cette diminution représente environ 81% pour le béton de fibres métalliques (BFM) et 87% pour le béton de fibres de polypropylène (BFPP).

IV.2. 10. Conclusion

L'objectif de cette étude expérimentale était de contribuer à une meilleure compréhension du comportement du béton renforcé par des fibres de récupération exposée à des températures élevées de 600°C et 800°C, ainsi que de l'influence des fibres métalliques (FM) et des fibres de polypropylène (FPP) sur ce comportement en compression et en flexion. Des échantillons de béton, qu'ils contiennent ou non des fibres, ont été fabriqués à des fins de tests. Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

La perte de masse en compression et en flexion calculée pour le béton de fibres métalliques (BFM), pour le béton de fibres en polypropylènes (BFPP) et ainsi que pour le béton sans fibres (BT, W=0%), nous a permis d'observer, que, plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. À 600°C, les différents bétons fibrés (BT, BFM, BFPP) ont

présenté une perte de masse presque de même ampleur ; cette forte perte de masse correspond au départ de l'eau liée chimiquement. Tandis qu'à 800°C, c'est le béton de fibres polypropylènes (BFPP) qui a connu une perte de masse significative, ainsi que le béton témoin BT (sans fibres), causée par la dégradation de la matrice cimentaire.

Pendant l'examen des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques à la sortie du four, des fissures sous forme de faïençage ont été constatées dans le cas des bétons de fibres métalliques (BFM), des bétons de fibres de polypropylène (BFPP), ainsi que dans le cas du béton témoin BT (W=0%). De plus, le béton témoin soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des éprouvettes.

Pour toutes les températures, on remarque que, les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté des résistances à la compression et à la flexion supérieures par rapport aux bétons de fibres de polypropylène (BFPP), ainsi qu'au béton témoin BT (sans fibres). À 800°C, on observe une chute significative de la résistance à la compression et à la flexion pour tous les types de béton, en comparaison avec les résistances à 20°C.

Conclusion générale

CONCLUSION G E N E R A L E

Le béton est devenu l'un des matériaux de construction les plus importants couramment utilisés dans de nombreux types de structures d'ingénierie. Il possède une résistance à la compression élevée mais est faible en résistance à la traction, ce qui peut entraîner des fissures dans la zone de tensions. Le béton armé est une combinaison de béton et d'acier, où l'acier renforce la résistance à la traction qui fait défaut au béton. Au cours des dernières décennies, le béton renforcé de fibres (BRF) a attiré de plus en plus l'attention dans le domaine du développement et est utilisé dans de nombreuses applications de génie civil telles que le béton projeté, les dalles de chaussée, les produits préfabriqués, les revêtements de tunnel, les structures sismiques, les réparations de dalles de tablier de pont, les applications marines et les applications réfractaires.

Cependant, certaines applications ne conviennent pas au béton armé classique en raison des contraintes qu'il rencontre dans des situations telles que la mise en place difficile des cages d'armatures dans certaines structures en béton armé (comme les pieux) ou l'insuffisance de l'enrobage dans les éléments minces (comme les dallages). Pour surmonter ces obstacles, les professionnels du domaine se tournent vers d'autres matériaux, notamment les bétons de fibres.

Les fibres d'acier sont de plus en plus utilisées pour le renforcement du béton, surtout dans le cas d'éléments minces. Elles remplacent ou complètent le renfort conventionnel selon le type de structure. Dans le cas des dalles (éléments minces) et du béton projeté (voûtes), on observe un gain de productivité. Comme la matrice de béton a une nature cassante et une faible résistance à la traction, le comportement mécanique en tension est conditionné par la fissuration du béton. La présence de fibres dans le béton joue un rôle important dans le comportement en traction du composite. En effet, les fibres interviennent à deux échelles :

- Au niveau du matériau en "cousant" les microfissures, elles retardent l'apparition de la fissuration. Cette action peut entraîner une augmentation de la résistance à la traction, cette augmentation dépend du pourcentage de fibres incorporées dans le béton et de leur orientation dans la masse de béton ;
- A l'échelle de la structure, en "retenant" les deux blocs de béton fissurés grâce à leur ancrage des deux côtés de la fissure.

Les bétons de fibres tirent leur appellation de l'ajout de fibres, dont les caractéristiques, la nature et la quantité sont intimement liées à leur usage. Face à ce dilemme, il est essentiel de bien comprendre les exigences de l'application, ainsi que l'impact de chaque variable sur le comportement du béton. Cela permet de formuler le matériau le plus approprié, nécessitant l'expérience comme outil indispensable.

Cette étude expérimentale a été entreprise pour évaluer l'effet de l'introduction de fibres ondulées en spirales issues de déchets d'usinage d'acier, dispersées aléatoirement, ainsi que de fibres à base de grilles en polypropylène disposées en couches, sur le comportement du béton. Ce comportement a été évalué à travers des tests de caractérisation mécanique des fibres ondulées (spirales) et des fibres en polypropylène, des tests de traction directe et de compression pour déterminer les propriétés mécaniques du béton utilisé, ainsi que des tests de flexion et de poinçonnement centré et excentré sur des dalles renforcées par des fibres en copeaux et des dalles renforcées avec des fibres en polypropylène de différentes tailles de mailles. Le pourcentage en volume des fibres métalliques a été varié (0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% et 1%), tandis que, les fibres en polypropylène ont été disposées en grilles. Une autre partie de l'étude a porté sur l'impact des températures élevées sur les propriétés mécaniques du béton renforcé par deux types de fibres : métalliques et polypropylène.

Notre étude expérimentale a révélé ce qui suit :

Les essais réalisés afin de caractériser le comportement mécanique des fibres métalliques et de polypropylène nous ont permis de mettre en évidence l'influence de la longueur des fibres et du nombre d'ondulations sur leur résistance en traction ($R_m = 275\text{MPa}$). Il apparaît que la meilleure résistance est atteinte pour une longueur de 80mm avec 3 ondulations. En revanche, pour les fibres en grilles de polypropylène, la résistance moyenne est de $R_m = 16,92\text{MPa}$.

Les résultats des essais effectués en flexion (courbes force-flèche) montrent que l'ajout de fibres métalliques (FM) pour les teneurs en fibres $W=0,8\%$ et $W=1\%$ confère une ductilité significative au matériau par rapport au béton témoin BT (sans fibres), ainsi que par rapport aux autres teneurs, dont on a obtenu des ruptures ductiles au lieu de ruptures fragiles.

- Les résultats de la première série (série 1) nous ont également permis de constater que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r=17,21\text{kN}$) est augmenté d'environ 16% par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=13,91\text{kN}$). En revanche, la déformation (flèche) est augmentée d'environ 8%. Par ailleurs, les

résultats des dalles renforcées par des fibres en grilles de polypropylène de petites mailles (GPP/PM) et grandes mailles (GPP/GM) (série 2), montrent une rupture fragile ;

- Les résultats de la deuxième série (série 2) nous ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=10,49\text{kN}$) est augmenté d'environ 31%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=8,00\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 41,32%.

Les résultats obtenus sur l'étude expérimentale du comportement au poinçonnement montrent que l'ajout de fibres métalliques (FM) avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ améliore la résistance et la rigidité par rapport aux autres teneurs, ainsi qu'au béton témoin BT (sans fibres).

- Les résultats de la première série (série 1) nous ont également permis de constater que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres de $W=0,8\%$ ($F_r = 29,48\text{ kN}$) augmente d'environ 55,56% par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r = 18,95\text{ kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 33,33%. Pour ce qui est de la deuxième série (série 2), l'effort de rupture des dalles renforcées avec des fibres en grilles de polypropylène de grandes mailles (GPP/GM) ($F_r = 27,84\text{kN}$) augmente d'environ 46,91% par rapport aux dalles sans fibres ($W=0\%$) ($F_r = 18,95\text{ kN}$). En revanche, la déformation (flèche) augmente d'environ 27,54 % ;
- Les résultats de la série 3 nous ont permis de noter que l'effort de rupture des dalles avec une teneur en fibres $W=0,8\%$ ($F_r= 30,13\text{kN}$) est augmenté d'environ 42%, par rapport aux dalles sans fibres ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 39% ;
- Les résultats de la série 4 ont permis de noter également que l'effort de rupture des dalles renforcées avec des grilles polypropylène de grande maille (GM) ($F_r=29,57\text{kN}$) est augmenté d'environ 41%, par rapport aux dalles sans fibres (BT) ($F_r=17,38\text{kN}$). Par contre la déformation (flèche) augmentée d'environ 45%.

Les résultats de l'étude ainsi que la compréhension de l'impact des températures élevées sur le béton renforcé par des fibres métalliques (FM) et des fibres de polypropylène (FPP) sur son comportement en compression et en flexion nous ont permis de constater :

- La perte de masse en compression et en flexion calculée pour le béton à fibres métalliques (BFM) et le béton à fibre en polypropylène (BFPP), ainsi que le béton sans fibres (BT, W=0%), nous a permis d'observer que plus la température augmente, plus la perte de masse augmente. À 600°C, les différents bétons fibrés (BT, BFM, BFPP) ont présenté une perte de masse presque de même ampleur ; cette forte perte de masse correspond au départ de l'eau liée chimiquement. Tandis qu'à 800°C, c'est le béton à fibre polypropylène (BFPP) qui a connu une perte de masse significative, ainsi que le béton témoin BT (sans fibres), causée par la dégradation de la matrice cimentaire ;
- Pendant l'examen des essais de compression sur des éprouvettes cylindriques à la sortie du four, des fissures sous forme de faïençage ont été constatées dans le cas des bétons de fibres métalliques (BFM), des bétons de fibres de polypropylène (BFPP), ainsi que dans le cas du béton témoin BT (W=0%). De plus, le béton témoin soumis à une température de 800°C a présenté un détachement de matière sur la moitié de la surface latérale des éprouvettes.
- Pour toutes les températures, on remarque que les bétons de fibres métalliques (BFM) ont présenté des résistances à la compression et à la flexion supérieures par rapport aux bétons de fibres de polypropylène (BFPP) ainsi qu'au béton témoin BT (sans fibres). À 800°C, on observe une chute significative de la résistance à la compression et à la flexion pour tous les types de béton, en comparaison avec les résistances à 20°C.

Le travail présenté dans cette thèse nécessite comme tout projet, des raffinements afin de pouvoir obtenir d'autres résultats importants et de tirer des conclusions encore plus précises. Ce travail futur s'inscrivant dans la suite du programme de notre recherche initié grâce à notre thèse est nécessaire afin d'étudier d'autres configurations d'essais, c'est-à-dire le renforcement du béton avec d'autres types de fibres, en prenant les conclusions tirées de cette thèse afin d'avoir des résultats meilleurs.

Les perspectives envisagées dans ce contexte sont :

Afin d'améliorer les résultats obtenus sur le béton renforcé avec deux types de fibres issues des déchets d'usinage des pièces en acier et les fibres à base de grilles en polypropylène à

partir de cette étude expérimentale, nous envisageons de prendre en compte certains paramètres, notamment :

- Mener des investigations sur des spécimens à grande échelle ;
- Évaluer l'impact de la géométrie des fibres (plates, ondulées) en réalisant des essais avec des fibres plates plutôt que des fibres ondulées afin de réduire les vides (cavités) dans la pâte cimentaire ;
- Examiner la disposition des fibres et éventuellement passer à des fibres longues orientées ;
- Pour les essais de poinçonnement excentré, il est nécessaire de réaliser systématiquement des essais par rapport à l'axe yy' (changer la position de la symétrie) afin de pouvoir comparer les résultats obtenus ;
- Modifier la disposition des grilles en polypropylène sur toute la hauteur de la dalle ;
- Effectuer une simulation numérique pour approcher ces résultats expérimentaux.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R.GUIDOTTI ; Poinçonnement des planchers-dalles avec colonnes Superposées fortement sollicitées ; Thèse de doctorat des sciences N° 4812, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, septembre 2010.
- [2] HAGER, I., Comportement à haute température des bétons à haute performance évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [3] HARMATHY, T.Z., Moisture in materials in relation to fire test, ASTM, Special Technical Publication, n° 385, 1964, pp. 74-95.
- [4] HERTZ K., limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, , pp. 103-116, 2003
- [5] NOUMOWÉ, N., Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n° 100-M39, pp. 326-330.2007.
- [6] HADDAD, R.H., AL-SALEH, R.J., AL-AKHRAS, N.M., Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, doi: 10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.
- [7] ARUPFIRE, HSE, Fire resistance of concrete enclosures, Work Package 1: data collection, Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work Package 8: spalling guidance, Rev B, 2005.
- [8] YVES PERROT “Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène” ; université de Bretagne Sud, thèse de doctorat – 236p, 2006.
- [9] CASTILLO, C., DURRANI, A.J., Effect of transient high temperature on highstrength concrete, ACI Materials Journal, title n°87-M7, pp. 47-53, 1990.
- [10] MERDAS ABDE-ELGHANI “Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA” ; université de Constantine, thèse de magister– 135p, 2005.

- [11] NAAMAN A.E, "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 , 2006.
- [12] ROSSI, P. ; HARROUCHE, N. ; LEMAOU, F., "Comportement mécaniques des bétons armé de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annales de L'ITBTP, N° 479, 1989.
- [13] ROMUALDI J.P., BATSON G.B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete" Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 89, No. EM3, pp 147-168, 1963.
- [14] ROSSI P., « Formulation du comportement mécanique du béton de fibre métallique (BFM)», Annales de l'I.T.B.T.P n0492. mars- Avril 1991.
- [15] SHAH P.S., "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes" ACI Materials Journal, V.88, No.6, pp. 595-602, 1991.
- [16] LI Z., LI F., CHANG T-Y.P., MAI Y-W., "Uniaxial tensil behavior of concrete reinforced with randomly distributed short fibers". ACI Materials Journal, V.95, No.5, pp. 564-573, 1998.
- [17] DENG Z., LI J., "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete", Computers and Concrete, Vol. 4, No.1, 19-31, 2007.
- [18] CUSENS A.R., "The measurement of the workability of dry concrete mixes", Magazine of Concrete Research, Vol 8, N° 22, pp 23-30, 1956.
- [19] BEAUDOIN J.J., "Handbook of Fiber Reinforced Concrete. Principles, Properties, Developments and Applications", Noyes Publications, Park Ridge, NJ, pp. 332, 1990.
- [20] YUN H.D., YANG I.S., KIM S.W., JEON E., CHOI C.S., FUKUYAMA H "Mechanical properties of high-performance hybrid-fibre-reinforced cementitious composites (HPHFRCCs)", Magazine of Concrete Research, 59, No. 4, May 2007, pp.257–271, 2007.
- [21] DHONDE H.B., MO Y.L., HSU T.T.C., "Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams", Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project N0-4819 Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas December 2005.
- [22] ROSSI P., HARROUCHE N., BELLOC A., « Méthodes de composition des bétons de fibres métalliques », Annales de L'ITBTP N0 475, 1989.

- [23] PAILLÈRE MME., « Le béton de fibres métalliques état actuel des connaissances », Annales de L'ITBTP N° 515, 1993.
- [24] JEJCIC O., ZANGHLLINE F., « Mortier et ciment armés de fibres », Une étude bibliographique, Annales de L'I.T.B.T.P. suppl. n° 347 série matériaux 51, pp. 46-87, 1977.
- [25] EDINGTON J., AL., « Steel fiber reinforced concrete », G.B. Building Res.Est ; Curent. Paper 63/74, 1974.
- [26] EDINGTON J., HANNANT., « Steel fiber reinforced of compacting by vibration », mat et const 5, N°25, janvier - février 1972.
- [27] DEHOUSSE N., LEJEUNE A., KUYKENS T., « Les mortiers et bétons renforcés de fibres d'acier », Bruxelles. C.S.T.C. Revue n°2, 1974.
- [28] 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.
- [29] ABSI, E, NAAMAN, A.E., (1986) Modèle rhéologique pour bétons de fibres. 3^{ème} symposium international, Sheffield, 1986.
- [30] BARTOS P., « Revue paper Bondin fiber reinforced cement and concret », USA Inst J of cem. Compos Vol N° 3. PP 31-37, 1981.
- [31] MOUGIN J.P., « Calcul des éléments simples et des structures de bâtiments, cours de béton armé », BEAL 91, Editions EYROLLES, Paris 1992.
- [32] ATLAOUI DJAMEL, « Influence des fibres de récupération sur le comportement du béton armé » thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2014.
- [33] MME BOUZEBODJA FATMA épouse IDDIR, « Poinçonnement de dalles armées de tissus composites » thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2017.
- [34] PAILLÈRE 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.
- [35] JALLIL W., DESTREE X., VANDWALLE M., « Béton renforcé de fibres, applications aux dallages Industriels », annales de L'TBTP N° 522, 1994.
- [36] 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.

- [37] SWAMY, R.N., AL-NOURI, K., (1975), "Flexural properties of steel fiber reinforced concrete", G.B.; concrete, vol9, n°6, p. 30-31, 1975.
- [38] ZHAN, Z., " Contribution au dimensionnement des pieux en béton de fibre", Thèse de doctorat, université d'Orléans, 1991.
- [39] MAMILLAN, M.; MINARD, J., Béton de fibres d'acier, Recherche n°91-1015, CEBTP, octobre 1987.
- [40] SHAH, S.P, "complete strain-stress curves for steel reinforced concrete in uniaxiale tension and compression". Paper 7.3, testing and test methods of fiber cement composites. RILEM symposium 1978, Construction press. LTD. Lancaster England, 545p, 1978.
- [41] 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'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, n°2, avril 1998.
- [42] BOUAFIA, Y., KACHI, M .S., FOURE, B., "Relation contrainte déformation en traction du béton armé de fibres d'acier", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N°3, juin 2002.
- [43] SERNA ROSS, "Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement". Thèse de doctorat de l'ENPC, 1984.
- [44] DJEBALI S., BOUAFIA Y., ATLAOUI D., BILEK A., "Study of mechanical behavior of chips reinforced concrete", Advanced materials research, Vol. 324, Trans Tech Publications, Switzerland, pp. 360 – 363, 2011.
- [45] FANELLA, D.A., NAAMAN, A.E., "Stress-strain propertie of fiber reinforced mortar in compression". Journal of the America concrete institute, vol. 79, N°4, July-august 1985.
- [46] NANNI A., « Spliting tension test for fiber reinforced concrete», ACI Journal, n0 85-M 27, pp 229-233, july-August 1988.
- [47] JONSTON C.D., « Propeties steel fiber reinforced portar and concret», Proceedings of the symposium on fibrous held. In LONDON, 1980.
- [48] KRENCKEL H., « Fiber reinforced brittle matrix materials», A.C.I. International symposium, sp 44.3 USA 1987.
- [49] RAMA KRISHAN V., OBERLING G., TATNAL P.C., « Flexural fatigue strength of streel fiber reinforced concrete», Rapport de recherché 1987.

- [50] CUYKENS T., VESTERMANS J., « Béton renforcé des fibres en acier». Extrait de C.S.T.C.- revue, N^o3, Septembre 1977.
- [51] ROBERTS T.M., NL H.O., « Shear failure of deep fiber reinforced concrete beams», GB ; Inst. J.Of Cem, Lightweight concr, Vol 4; n^o3; PP 145-152, 1982.
- [52] 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.
- [53] SWAMY R.N., BAHIA H.M., «The effectiveness of steel fiber as shear reinforcement», USA. Concr. Inst. Des. Const. Vol. 7, N^o3, 1985.
- [54] VALADE T.H., « Comportement des bétons armés de fibres métalliques», Mémoire de recherche développement E. N. S de CACHAN Dec 1987.
- [55] LATASTE, J.F ; BEHLOUL, M ; BREYSSET, D., 'Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive', 25^{ème} rencontre de l'AUGC, 23-25 Mail 2007.
- [56] ABDI HANANE, « Effet de la Température sur le comportement mécanique du béton renforcé par des fibres métalliques » thèse de Master en génie civil, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2023.
- [57] HAGER, I., 'Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques', Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [58] HARMATHY, T.Z., 'Moisture in materials in relation to fire test', ASTM, Special Technical Publication, n^o 385, pp. 74-95, 1964.
- [59] HERTZ K., limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 103-116, 2003.
- [60] NOUMOWÉ, N., Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n^o 100-M39, pp. 326-330, 2003.
- [61] BOTH, R., The behaviour of unprotected loaded concrete tunnel linings subjected to RWS hydrocarbon fire, TNO report 2000-R01360, 2000.
- [62] HADDAD, R.H., AL-SALEH, R.J., AL-AKHRAS, N.M., Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, doi:10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.

- [63] HANNANT, D J., “ Fiber-reinforced concrete Advanced Concrete Technology – processes ed. J Newman and B S Choo” (Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier) chapter 6 pp 1 – 17, 2003.
- [64] EUROCODE 2., “Calcul des structure en béton Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments”. Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings. ENV 1992-1-1, NF18711, 1992.
- [65] MENOUE, A., “Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l’endommagement thermique”, thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2004.
- [66] MINDEGUIA, J-C., “Contribution expérimentale à la compréhension des risques d’instabilité thermique des bétons”, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2009.
- [67] CHOINSKA, M., “Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure”, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [68] CRUZ, C.R., GILLEN, M., “Thermal expansion of portland cement paste, mortar or and concrete at high temperature”, Fire and Materials, Vol. 4, pp. 66-70, 1980.
- [69] CASTILLO, C., DURRANI, A.J., “Effect of transient high temperature on high strength concrete”, ACI Materials Journal, title n°87-M7, pp. 47-53, 1990.
- [70] PIMIENTA, P., “Le comportement au feu des BHP”, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 77-124, 2000.
- [71] KANEMA, M., “Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons”, thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.
- [72] DIEDERICHS, U., JUMPPANEN, U.M., “High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete”, Verlag für architektur und techn.wissencheften, Ernst & schn, pp. 191-197, 1992.
- [73] PHAN, L.T., “High-strength concrete at high temperature- an overview”, National institute of standards and technology, High performance concrete 6th International symposium proceeding, Vol. 1, 2002.

- [74] DIAS, W.P.S, KHOURY, G.A, SULLIVAN, P.J.E, ‘‘Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C’’, ACI Materials Journal, title n°87-M18, 1990.
- [75] MIN, LI, CHUN XIANG, Q., SUN, W., ‘‘Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research’’, Vol. 34, 2004, pp.1001-1005.
- [76] HARADA, T., TAKEDA, J., YAMANE, S., FURUMURA, F., Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, International seminar on concrete for nuclear reactors, Germany, Vol. 1, 5, pp. 377-406, October 1970.
- [77] HAMMER,TA., ‘‘High strength concrete, phase 3, SP6 fire resistance report 6.2, Spalling reduction through material design’’, SINTEF report STF70 F92156, Trondheim, Norway, 1992.
- [78] KOMONEN, J., PENTTALA, V., ‘‘Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes’’, Fire Technol 2003, 39(1), pp.23-34, 2003.
- [79] KALIFA, P., MENNETEAU, F.D., QUENARD, D., ‘‘Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research’’, Vol. 30, pp. 1-13,2000.
- [80] KHOURY, G. A., ‘‘Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment’’, Magazine of Concrete Research 44, N°161, pp. 291-309, 1992.
- [81] SABEUR, H., ‘‘Etude du comportement du béton à hautes températures, une nouvelle approche thermo-hydro-mécanique couplée pour une modélisation du fluage thermique transitoire’’, thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée, 2006.
- [82] R.FAVRE, J.-P.JACCOUD, O.BURDET ET H.CHARIF, ‘‘Dimensionnement des structures en béton’’ ; volume 8, 2e édition, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 591 p, 1997.
- [83] T.STEIN, A.GHALI ET W.DILGER; ‘‘Distinction between punching and flexural failure modes of flat plates’’, ACI Structural Journal, volume 105, numéro 2, p. 238-241, 2007.
- [84] T.CLEMENT ; ‘‘Influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement de dalles en béton armé’’ ; thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse 2012.

- [85] TENG J.G; "BEHAVIOUR of GFRP-strengthened RC cantilever slabs, Construction and Building Materials"; Volume 15, Issue 7, , pp 339- 349, October 2001.
- [86] L.TASSINARI ; "Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé" ; école polytechnique fédérale de Lausanne ; thèse de doctorat NO 5030 ; 2011.
- [87] S. GUANDALINI ; "Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé"; école polytechnique fédérale de Lausanne ; France ; 2005.
- [88] MOHAMED OUALHA, "Contribution à l'étude des ponts a dalles pleines en béton précontraint renforcé de fibres métalliques". Mémoire de maîtrise Sherbrooke (Québec) Canada. Fevrier 2012.
- [89] A.R.KHALOO ET M.AFSHARI, "Flexural behaviour o f sm all steel fib re reinforced concrète slabs". Department of civil Engineering, Sharif University of technology, Tehran, Iran. Volume 27, Issue 1, pp.141-149, 2005.
- [90] ALPER KARADIS , KABIL CETIN , TAHA YASIN ALTIOK1 , ALI DEMIR "Investigation bending behaviors of the slabs with glass fiber reinforced polymer composite and steel bars", (Manisa Celal Bayar University, Department of Civil Engineering, Manisa, Turkey. Manisa Celal Bayar University, Kula Vocational School, Manisa, Turkey), 2021.
- [91] RAHLI OUSSAMA, BELKADI HADJER, BEDJOU SOUHILA « Etude comparative du comportement mécanique des dallages industriels en béton arme et celles en béton de fibres métalliques ». FGC /Université des Sciences et de la Technologie, Houari Boumediene, Alger, Colloque Décembre 2018.
- [92] Dallages, Conception, Calcul et Exécution. Partie 1 : cahier des clauses techniques des dallages à usage industriel ou assimilés, NF DTU 13.3, 2007.
- [93] BEKAERT FRANCE SAS, "Dallages en béton de fibres métalliques", Document Technique d'Application, 2009.
- [94] EL HOUSSAIN ROCHDI ; "Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites" ; thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon 1, France 2004.
- [95] ALI ELLOUZE, MONGI BEN OUEZDOU, MOHAMED ALI KARRAY, AOUICHA BEDDEY, "Etude des Dallettes en Bétons de Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux", Laboratoire de Génie Civil, ENIT, BP 37, 1002 Tunis-Le-Belvédère, Tunisie ,

Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, BP 88A, 3099 El Boustan, Sfax, Tunisie, 2007.

[96] R.N. SWANG ET P.S. MANGAT, “Compatibility of steel fibre reinforced concrete”, Vol. 8, N°5, pp. 34-35, 1974.

[97] P. CASANOVA, « Béton renforcé de fibres métalliques du matériau à la structure ». Thèse de l'école nationale des ponts et chaussées, 1995.

[98] N. HARROUCHE, «Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques», Thèse de l'université Paris VI, 1989.

[99] MANSUR, “Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups”, Journal of Sc.Eng., vol12, N°9, pp. 2066-2079, 1986.

[100] P. ROSSI, « Le développement industriel des bétons de fibres métalliques », Presses de l'ENPC, Paris, 2002.

[101] HALEEM K. HUSSAIN, ABDULNASSER M. ABBAS ET MOHAMMED FARHAN OJAIMI. ‘Fiber-Type Influence on the Flexural Behavior of RC Two-Way Slabs with an Opening’, Civil Engineering Department, Engineering College, University of Basrah, Basrah 61004,Iraq, 2022.

[102] AHMED M. EL-HANAFY, SAMIHA E. ALHARTHY & AHMED M. ANWAR; ‘Behavior of Concrete Slabs Reinforced by Different Geosynthetic Materials’, HBRC Journal, 18:1, 107-121, DOI: 10.1080/16874048.2022.2097363, 2022.

[103] DREUX, G. FESTA, J., 2007. “Nouveau guide du béton et de ses constituants”, Huitième édition 1998, Troisième tirage 2007. New guide to concrete and its constituents,Eighth edition 1998, Third printing. *Eyrolles*, France, 2007.