

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA**



**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département Génie Civil**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

**RABIY FATMA ZAHRA
ZIATI AMIRA**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

**Filière : Génie Civil
Option : Structures**

Thème :

**Comportement des poutres multicouches en béton de fibres
métalliques : cas d'une répartition graduelle des fibres.**

Devant le jury composé de :

**Mr : GLAOUI BACHIR
Mme : ADJAL LEILA
Mr : AIT TAHAR KAMEL
Mr : MOUSSAOUI FAHEM**

**PR
MCB
PR
MCB**

**UAMOB
UAMOB
UAMOB
UAMOB**

**Président
Encadreur
Co-encadreur
Examineur**

Année universitaire 2023 - 2024

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu le bon Dieu de nous avoir donné la volonté, la patience et le courage pour accomplir ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre promotrice Mme Adjal L et notre co- promoteur Pr. Ait tahar K pour nous avoir proposé et dirigé ce travail de recherche . Nos vifs remerciements pour leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de ce travail de recherche. Leurs connaissances et leur expertise ont été essentielles pour la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour leurs remarques constructives éventuelles pour une meilleure amélioration de la qualité du manuscrit.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers l'ensemble des professeurs et intervenants du département de Génie Civil, université AKLI MOHAND OUL HADJ- BOUIRA et les techniciens du laboratoire qui, par leurs enseignements et leur disponibilité, ont contribué à notre formation et à l'acquisition des compétences nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Mr : Benalia M et Bousta A pour leur aide précieuse et leur accompagnement lors de notre stage au sein de LCTP Bouira. Leur expertise et leur encadrement ont été déterminant pour la réussite de cette expérience professionnelle.

Enfin, nous remercions notre famille et nos amis pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Un grand Merci à Tous

Dédicace

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut....

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce projet de fin d'étude.

A mon cher père, qui m'a toujours encouragé dans mon parcours académique.

A ma chère mère bien-aimée, par la présence de laquelle je suis ici aujourd'hui.

Il n'Ya aucune récompense pour vous rendre la pareille, merci beaucoup.

A mon grand père et ma grand-mère sont ma source d'inspiration, qui dieu prolonge ta vie.

Mes belles sœurs, Hanane, Imane, Maroua t'avoir à mes cotés est une joie pour moi.

Mes frères, Tarek, Walid, Islam et leurs femmes Hiba, Imane.

Et mes amis intimes Aicha, Affaf, Imane, Namaa, Yassmine, Samah,

Et toutes mes amis et toutes les belles personnes de ma vie.

Fatima

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon cher père

A ma chère mère

Aucun mot, aussi signifiant soit-il, ne serait exprimer le degré d'affection de gratitude, de respect, et de connaissance que j'éprouve pour vous.

A mes grand-mère, Mbarka, Saadia, Que dieu vous procure longue vie avec bonheur et santé.

Ma belle-sœur, Ikram et mes frères Youcef, faicel

J'apprécie de t'avoir.

Mes meilleurs amis Yassmine, Amira, Fadia, Assia, je vous aime tous.

Nous exprimons notre sincère gratitude envers la famille Ziati ainsi qu'envers toutes les personnes qui nous ont apporté leur soutien tout au long de notre parcours de formation.

Amira

Table des matières

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACE.....	II
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
RESUME.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
ملخص.....	XIX
INTRODUCTION GENERALE.....	01

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS DE FIBRES

I.1.Introduction.....	3
I-2 Constituants de béton.....	4
I-2-1 Ciment.....	4
I-2-1-1 Définition.....	4
I-2-1-2 Fabrication du ciment.....	4
I-2-1-3 Types de ciment.....	5
I-2-2 Les Granulats	6
I-2-2-1 Généralité.....	6
I-2-2-2 Différents types de granulats.....	6
I-2-2-3 Classification des Granulats.....	7
I-2-3 Sables.....	7
I-2-3-1 Généralité.....	7
I-2-3-2 Différents constituants du sable.....	8
I-2-3-3 Classification des sables.....	9
I-2-4 L'eau pour le gâchage.....	10
I-2-5 Adjuvantes.....	10
I-3 Caractérisation physique des matériaux.....	11

TABLE DES MATIERES

I-3-1 Masses volumiques.....	11
I-3-2 Porosité (p).....	12
I-3-3 Teneur en eau (W %)	12
I-3-4 Taux d'absorption d'eau (AB %)	12
I-3-5 Propreté des granulats.....	12
I-3-5-1 Propreté des sables.....	13
I-3-5-1-1 Equivalent de sable « ES »	13
I-3-5-1-2 Essai au bleu de méthylène.....	14
I-3-5-2 Gravillons, évaluation de la propreté de la surface (p).....	14
I-4 La formulation des bétons.....	14
I-4-1 Méthode de Dreux- Gorisse.....	14
I-4-2 Méthode de Bolomey.....	15
I-4-3 Méthode de Faury.....	15
I-4-4 Méthode de LA VALETTE.....	16
I-4-5 Méthode de Joisel.....	16
I-5 Types et propriétés mécanique des fibres.....	17
I-5-1 Généralité.....	17
I-5-2 Béton fibré.....	17
I-5-3 Types de fibres.....	18
I-5-3-1 Fibres d'Amiante.....	18
I-5-3-2 Fibres de Verre.....	18
I-5-3-3 Fibres de Carbone.....	19
I-5-3-4 Fibres Polymères.....	20
I-5-3-5 Fibres d'acier.....	21
I-5-4 Propriétés des bétons de fibres.....	22

TABLE DES MATIERES

I-5-4-1 L'ajout des fibres métalliques.....	22
I-5-4-2 L'ajout de fibres organiques.....	23
I-5-4-3 L'ajout de fibres minérales.....	23
I-5-4-4 L'ajout des fibres.....	24
I-5-4-5 Evolution de la résistance à la compression du béton fibré.....	24
I-5-4-6 Résistance à l'abrasion du béton fibré.....	24
I-5-6 Application des bétons de fibres.....	25
I-5-7 Exemple d'application réel de béton fibré.....	26
I-5-7-1 béton fibré dans un tunnel.....	26
I-5-7-2 Un nouveau pont ferroviaire entièrement en CFUP.....	26
Conclusion du chapitre.....	27

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA FLEXION DES POUTRES

II-1 Introduction	28
II-2 L'équilibre des poutres.....	29
II-3 Différents types des poutres.....	29
II-3-1 Poutres isostatique.....	29
II-3-1-1 Poutres simplement appuyée.....	30
II-3-1-2 Poutre doublement appuyée.....	30
II-3-2 Poutres hyperstatique.....	30
II-3-2-1 Poutres continues.....	31
II-3-2-2 Poutres consols.....	31
II-4 Théorie de flexion.....	32
II-4-1 Définition de flexion.....	32

TABLE DES MATIERES

II-4-1-1 Flexion trois points.....	32
II-4-1-2 Flexion quatre points.....	33
II-4-2 L'importance de la théorie de flexion des poutres.....	33
II-4-3 L'effet de la fibre neutre sur les poutres.....	34
II-4-3-1 Déformation.....	34
II-4-3-2 Efforts de cohésion	34
II-4-3-3 Contraintes.....	35
II-4-3-3-1 Contrainte normale pour une poutre droite.....	35
II-4-3-4 Cisaillement.....	35
II-4-4 Comportement des structures.....	36
II-4-5 Conception efficace des structures.....	36
II-4-6 Optimisation des matériaux.....	37
II-4-7 Analyse de la sécurité et de la durabilité.....	38
II-5 Etat de comportement des poutres renforcés par des fibres.....	39
II-6 Conclusion du chapitre.....	56

CHAPITRE III : PROCEDURE EXPERIMENTALE

III-1 Introduction.....	57
III-2 Matériaux utilisés.....	57
III-2-1 Ciment.....	57
III-2-1-1 Caractéristiques techniques.....	58
III-2-2 Le Sable.....	58
III-2-3 Granulats.....	58
III-2-4 L'eau de gâchage.....	59

TABLE DES MATIERES

III-2-5 Fibres.....	59
III-3 L'analyse granulométrique par tamisage « NF EN 933-1(Mai 2012) »	60
III-3-1 Principe de l'essai.....	60
III-3-2 Equipement nécessaire.....	61
III-3-3 Mode opératoire	61
III-4 Coefficient D'aplatissement « NF EN 933-3(Mars 2012) »	64
III-4-1 Principe de l'essai.....	64
III-4-2 Equipements nécessaires.....	64
III-4-3 Mode opératoire.....	64
III-5 Équivalent de sable « NF EN 933-8 (juillet 2015) »	66
III -5-1 Principe de l'essai.....	66
III-5-2 Matériels utilisés.....	66
III-5-3 Mode opératoire.....	67
III-6 Masse volumique apparente pp « NF EN 1097-3 (Aout 1998) »	68
III-7 Masse volumique absolue pa.....	69
III-8 Détermination de la résistance à la fragmentation par la Méthode de LOS ANGELES « NF EN 1097-2 (Avril 2020) »	69
III-9 Détermination des résistances des ciments « NF EN 196-1 (sept .2016) »	70
III-10 Formulation du béton ordinaire (Méthode de Faury)	73
III- 11 Composition de béton.....	74
III-11-1 Pourcentages des constituants	74
III-11-2 Calcul de la composition de 1m ³ de béton.....	74
III-11-3 Caractéristiques de béton durci.....	74
III-11- 4 Calcul le volume d'éprouvette.....	75
III-11-5 Calcul les masse des agrégats.....	76

TABLE DES MATIERES

III-11-6 Présentation d'éprouvettes utilisées.....	76
III-12 Protocole expérimental.....	77
III-12-1 Dimensions des poutres.....	77
III-12-2 Dosage des fibres.....	78
III-13 Confection du béton.....	78
III-13-1 Préparation des matériaux utilisé.....	78
III-13-2 Malaxage et mise en œuvre.....	79
III-13-3 Mesure de l'affaissement.....	79
III-13-3 Remplissage et vibration.....	80
III-13-4 Démoulage.....	80
III-14 Procédures d'essais (essai de flexion)	81
Conclusion du chapitre	82
 CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	
 IV-I Introduction.....	 83
IV-2 Résultats et discussion.....	83
Conclusion de chapitre.....	90
CONCLUSION GENERALE.....	91
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Le pont situé au jardin des plantes de Grenoble.....	04
Figure I.2. Fabrication de ciment.....	05
Figure I.3. Les différents types de granulats.....	07
Figure I.4. L'eau de gâchage.....	10
Figure I.5. Équivalent de sable.....	13
Figure I.6. Les fibres d'amiante.....	18
Figure I.7. Les fibres de verre.....	19
Figure I.8. Les fibres de carbone.....	20
Figure I.9. Les fibres polymère.....	21
Figure I.10. Les fibres d'acier.....	22
Figure I.11. Fibres présentes dans le béton fibré.....	24
Figure I.12. Tunnel en paris.....	26
Figure I.13. Le nouveau pont ferroviaire de l'Aiguillon, réalisé en CFUP armé (Gruner).....	26
Figure II.1. Poutre en béton.....	29
Figure II.2. Poutre isostatique.....	30
Figure II.3. Poutres simplement appuyées.....	30
Figure II.4. Poutre hyperstatique.....	31
Figure II.5. Les poutres continues.....	31
Figure II.6. Les poutres consols.....	32
Figure II.7. Théorie de flexion.....	32
Figure II.8. Flexion trois points.....	33
Figure II.9. Flexion en 4 points.....	33
Figure II.10. "Essai de flexion trois points sur béton."	34
Figure II.11. Déformation d'une poutre.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure II.12. Les composantes du torseur de cohésion.....	35
Figure II.13. Moment de flexion et distribution de la contrainte.....	35
Figure II.14. Effort tranchant dans le cas de la flexion Simple.....	36
Figure II.15. Diagramme de charge-flèche de la poutre P5.....	40
Figure II.16. Courbe charge-flèche P4 P6 P7.....	40
Figure II.17. Courbe charge / flèche de la poutre P11.....	41
Figure II.18. Comparaison entre la fissuration, la plastification et la rupture des poutres P1, P3 et P4.....	41
Figure II.19. Modes de rupture des poutres P2, P9 et P10.....	42
Figure II.20. Les bétons bio-fibrés ont une résistance en compression après une cure de 7 jours (a) et 28 jours (b).....	43
Figure II.21. Les bétons bio-fibrés ont une résistance en flexion après 7 jours (a) et 28 jours (b).....	43
Figure II.22. Vitesse de couple dans les bétons à fibres métalliques.....	44
Figure II.23. La viscosité affecte les qualités rhéologiques du béton avec une teneur en fibres variant de 0,3 % à 2,75 %.....	45
Figure II.24. Le seuil d'écoulement et le pourcentage de fibres (L=50mm) sont en relation...	45
Figure II.25. Modifications de la viscosité plastique en fonction du taux (l=30mm)	46
Figure II.26. La viscosité plastique avec pourcentage des fibres.....	46
Figure II.27. Expansion du seuil d'écoulement avec le pourcentage de fibres pour 30 mm et 50 mm.....	46
Figure II.28. Variation de l'affaissement et du temps d'écoulement avec la masse des fibres...	47
Figure II.29. Changement de la contrainte de flexion fonction de la flèche.....	48
Figure II.30. La contrainte de compression évolue en fonction du raccourcissement.....	48
Figure II.31. Rupture des poutres en béton et en béton de fibres.....	49
Figure II.32. La rupture des poutres sans la force de cisaillement des fibres métalliques.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure II.33. Rupture des poutres en béton de fibres métalliques courtes.....	49
Figure II.34. Rupture des poutres en béton de fibres métalliques courtes et longues.....	50
Figure II.35. Lois de comportement en traction du BFUP A.....	52
Figure II.36. Lois de comportement en traction du BFUP B.....	52
Figure II.37. Lois de comportement en traction du BFUP C.....	53
Figure II.38. Résultat d'essais d'os en BFUP.....	55
Figure II.39. Résultat d'essais d'os en BFHP.....	55
Figure II.40. Prisme entaillé – Moyenne BFHP.....	56
Figure III.1. Le ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA)	57
Figure III.2. Les sables utilisés.....	58
Figure III.3. Les graviers.....	59
Figure III.4. L'eau de gâchage.....	59
Figure III.5. Les fibres utilisées.....	60
Figure III.6. La série des tamis.....	62
Figure III.7. La grille à fentes.....	65
Figure III.8. Matériels utilisés d'équivalent de sable.....	67
Figure III.9. L'équivalent de sable.....	68
Figure III.10. Essai de LOS ANGELES.....	70
Figure III.11. Des moules prismatiques (4 x 4 x 16 cm ³)	71
Figure III.12. Table vibrante.....	71
Figure III.13. Chambre d'humidité.....	71
Figure III.14. Les échantillons à l'air.....	72
Figure III.15. La presse de flexion.....	72
Figure III.16. La presse de compression.....	72

LISTE DES FIGURES

Figure III.17. Courbe de référence FAURY.....	73
Figure III.18. Essai de compression a 7 jours.....	75
Figure III.19. Éprouvettes prismatiques.....	76
Figure III.20. Les matériaux utilisés.....	78
Figure III.21. Le malaxeur.....	79
Figure III.22. Mesure d'affaissement.....	79
Figure III.23. Le béton.....	80
Figure III.24. Malaxage et vibration de béton fibré.....	80
Figure III.25. Démoulage des éprouvettes.....	81
Figure III.26. Préservation des éprouvettes dans chambre humide pendant 28 jours.....	81
Figure III.27. Appareil de chargement (charge en deux points)	82
Figure III.28. Configuration du test de flexion en 4 points.....	80
Figure IV.1. Courbe force -flèche de la poutre témoin (P-Réf)	84
Figure IV.2. Mode de rupture de la poutre témoin (P-Réf)	84
Figure IV.3. Courbe force -flèche de la poutre en BAF (P-ST)	84
Figure IV.4. Mode de rupture de la poutre en BAF (P-ST)	85
Figure IV.5. Courbe force -flèche de la poutre mi-hauteur (P-MH)	85
Figure IV.6. Mode de rupture mi-hauteur (P-MH)	85
Figure IV.7. Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (P- a70%b30%)	86
Figure IV.8. Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- 70% 30%)	86
Figure IV.9. Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (p- a80% b20%)	87
Figure IV.10. Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- 80% 20%)	87
Figure IV.11. Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (p- a100%b 0%)	88
Figure IV.12. Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- a100%b 0%)	88

LISTE DES FIGURES

Figure IV.13. Courbe force -flèche pour toutes les variantes.....	89
Figure IV.14. Courbe évolution de la résistance.....	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. La Fabrication détaillé de ciment.....	05
Tableau I.2. Les classes du ciment.....	06
Tableau I.3. Les limites inférieures et supérieures du diamètre des grains et les numéros de tamis A. S. T. M.....	08
Tableau I.4. La nature et qualité du sable.....	09
Tableau I.5. Dosage en adjuvants par apport au poids de ciment.....	11
Tableau I.6. La qualité du sable.....	14
Tableau I.7. Les caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante par AÏT AMEUR.....	18
Tableau I.8. Quelques caractéristiques des fibres de verre.....	19
Tableau I.9. Quelques propriétés des fibres de carbone.....	20
Tableau I.10. Les caractéristiques mécaniques des fibres de polymère.....	21
Tableau I.11. Exemple d'application de béton fibré.....	25
Tableau II.1. Détails des éprouvettes.....	40
Tableau II.2. Composition massique du béton.....	44
Tableau II.3. Composition du béton témoin (pour un m ³)	47
Tableau II.4. Les résultats des tests de compression et de traction par fendage (MPa).....	48
Tableau II.5. Caractéristiques de la composition des BFUP étudiés.....	51
Tableau II.6. Synthèse des essais de cisaillement pur réalisés.....	51
Tableau II.7. Programme expérimental (phases I et II)	54
Tableau II.8. Propriétés en compression du BO.....	54
Tableau II.9. Propriétés en BFHP.....	54
Tableau II.10. Propriétés en compression du BFUP.....	55
Tableau III.1. Les analyses chimiques de ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA)	58
Tableau III.2. Les propriétés physiques de ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA)	58

Tableau III.3. Caractéristiques de Fibre	60
Tableau III.4. Analyse granulométrique pour le sable 0/3	62
Tableau III.5. Analyse granulométrique pour le sable 0/5.....	63
Tableau III.6. Analyse granulométrique pour le gravier 3/8.....	63
Tableau III.7. Analyse granulométrique pour le gravier 8/15.....	64
Tableau III.8. Coefficient d’aplatissement de gravier 3/8.....	65
Tableau III.9. Coefficient d’aplatissement de gravier 8/15.....	66
Tableau III.10. Équivalent de sable 0/5.....	68
Tableau III.11. Équivalent de sable 0/3.....	68
Tableau III.12. La masse volumique apparent.....	69
Tableau III.13. La masse volumique absolu.....	69
Tableau III.14. Valeur de LA.....	70
Tableau III.15. Résultats de flexion et compression.....	73
Tableau III.16. Compositions du béton utilisé et leurs caractéristiques.....	74
Tableau III.17. Caractéristiques du béton durci à 7 jours.....	75
Tableau III.18. Les masse des agrégats d’un éprouvette.....	76
Tableau III.19. Le dosage de fibres.....	78
Tableau IV.1. Résultats des essais de flexion.....	83

Résumé

Ce travail expérimental consiste à étudier le comportement des poutres multicouches en béton de fibres métalliques disposées d'une manière graduelle dans les couches de la poutre.

Au total, Dix-huit (18) éprouvettes de sections droites de (10×15) cm² et une longueur de 60 cm, (03) éprouvettes non renforcées (poutre témoin), et (15) éprouvettes renforcées de fibres métalliques,

Cinq (05) éprouvettes renforcées avec la même fraction volumique de 1,5% de fibres, et avec différentes dispositions par couches sont considérées. Les différentes configurations considérées sont :

H : Poutre en BAF (P-HT)

H/2 : Poutre mi-hauteur (PH/2)

a 70%&b30% : Poutre multi couche (P- a70%b30%)

a 80%&b20% : Poutre multi couche (P- a80% b20%)

a100%&b0% : Poutre multi couche (P- a100%b 0%)

Les résultats de l'essai de flexion 4- points ont été présentés sous forme de graphes et courbes et analysés. Une confrontation est menée pour mettre en évidence l'intérêt de notre proposition de répartition des fibres métalliques par couches considérées de la poutre.

Abstract

This experimental work consists of studying the behavior of multilayer metal fiber concrete beams arranged in a gradual manner in the layers of the beam.

In total, Eighteen (18) specimens with straight sections of (10×15) cm² and a length of 60 cm, (03) unreinforced specimens (control beam), and (15) specimens reinforced with metal fibers, Five (05) specimens reinforced with the same volume fraction of 1.5% of fibers, and with different layer arrangements are considered. The different configurations considered are:

H: Beam in BAF (P-HT)

H/2: Half-height beam (PH/2)

a 70%&b30%: Multi-layer beam (P- a70%b30%)

a 80%&b20%: Multi-layer beam (P- a80% b20%)

a100%&b0%: Multi-layer beam (P- a100%b 0%)

The results of the 4-point bending test were presented in the form of graphs and curves and analyzed. A comparison is carried out to highlight the interest of our proposal for the distribution of metal fibers by considered layers of the beam.

ملخص

يتضمن هذا العمل التجريبي دراسة سلوك العتبات الخرسانية ذات الألياف المعدنية متعددة الطبقات والمرتبة بشكل تدريجي في طبقات العتبة

إجمالاً ثمانية عشر (18) نموذجاً بمقطع مستقيم (15×10) سم 2 وطول 60 سم، (03) نموذجاً غير مقوى (عارضة تحكم)، و(15) نموذجاً مقوا بالألياف المعدنية،

تمت دراسة خمس (05) عينات مقواة بنفس الجزء الحجمي 1.5% من الألياف وبترتيبات طبقات مختلفة التكوينات المختلفة التي تم النظر فيها هي

H : شعاع BAF (P-HT)

H/2 شعاع نصف الارتفاع : (PH/2)

(P- a70%b30%) شعاع متعدد الطبقات : a70%&b30%

(P- a80%20%) شعاع متعدد الطبقات : a80%&b20%

(P- a100%b0%) شعاع متعدد الطبقات a100%&b0%

تم عرض نتائج اختبار الانحناء رباعي النقاط على شكل رسوم بيانية ومنحنيات وتحليلها. تم إجراء مقارنة لتسليط الضوء على مدى اهتمام اقتراحنا بتوزيع الألياف المعدنية حسب طبقات العارضة المدروسة .

Introduction générale

Introduction générale

Durant sa durée de vie, une structure de Génie Civil est soumise à différentes contraintes de nature et d'intensité, telles que les contraintes normales de traction et de compression résultant de la flexion des poutres. Des contraintes de cisaillement liées à l'effort tranchant sont également présents lors de la flexion.

Un des matériaux les plus couramment employés dans la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil est le béton. Elle exige peu de ressources pour être mise en place. Organisé à partir de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvant. Lorsqu'il est question de structures en béton, étant donné sa faible résistance à la traction, il est renforcé par des armatures en acier dans les parties tendues par la flexion, ce qui permet de supporter des contraintes de traction bien supérieures à celles que le béton peut supporter seul. Le comportement en section fissurée d'un matériau composite se manifeste alors.

Le béton possède des caractéristiques mécaniques intéressantes et connaît des progrès significatifs depuis les années 1980. De nouvelles techniques et méthodes ont été développées en se basant sur des thèses et des théories qui impliquent l'incorporation de fibres métalliques, plastiques ou autres dans les bétons. Les applications de ces bétons renforcés de fibres sont variées. Il y a des dalles industrielles, des canalisations d'assainissement réparées, des projections sous voûte dans les tunnels, des chaussées entièrement en béton de fibres, des chaussées d'autoroutes ou des chaussées de parkings aéronautiques.

D'autre part, les fibres ont la capacité de renforcer le béton dans les zones qui sont soumises à des sollicitations intenses. La présence des fibres peut avoir deux fonctions

- Il est important de retarder la fissuration du béton au-delà des conditions de service de la structure afin d'éviter la nécessité de mettre en place des armatures
- Une fois que la fissuration a commencé, il est important de limiter son ouverture et de préserver sa durabilité, que ce soit avec ou sans l'utilisation d'armatures transversales.

L'objectif principal de cette étude consiste à améliorer la résistance à la flexion des poutres multicouches en béton de fibres métalliques sans modifier la quantité de fibres

- Le premier chapitre propose une analyse de la littérature concernant les caractéristiques mécaniques des matériaux employés dans la fabrication du béton. Il présente également la définition de béton et les constituants, les caractéristiques physiques des matériaux et la formulation de béton, aussi les types et les propriétés mécaniques des fibres et le domaine d'application.
- Le deuxième chapitre aborde les généralités sur la flexion des poutres, la définition, l'équilibre des poutres, les différents types des poutres, et la définition et l'importance de la théorie de flexion, et l'état de comportement des poutres en béton renforcé par des différents types des fibres.
- Le troisième chapitre, est consacré à la présentation des matériaux et du matériel utilisés ainsi que le mode d'essai suivi pour l'identification physique des matériaux, l'élaboration et la réalisation des éprouvettes et la procédure suivie des essais mécaniques.
- Dans le chapitre quatre, nous avons présenté et analysé les résultats de l'essai de flexion 4-points. Les résultats sont présentés en utilisant des courbes qui illustrent les forces et les flèches.

Une conclusion générale termine notre travail.

Chapitre I

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS DE FIBRES

I.1.Introduction

Le mot "béton" trouve ses origines dans le latin "bitumen, » qui signifie "asphalte." Cependant, le béton moderne, tel que nous le connaissons aujourd'hui, a évolué au fil des siècles.[1] Le béton est un matériau de construction composé d'un mélange de ciment, de granulats (sable, gravier), d'eau, Il est possible d'utiliser des adjuvants, des additions ou des additifs pour améliorer ses propriétés lors de la mise en œuvre ou lors des phases finales. Il y a différents types de béton, qu'ils soient fabriqués sur le chantier, en centrale BPE (béton prêt à l'emploi) ou en usine de préfabrication, qui respectent des spécifications précises et peuvent être classés dans des catégories spécifiques comme les bétons hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP), les bétons fibres à ultra-hautes performances (BFUP). [2] Le béton fibré est principalement constitué de béton prêt à l'emploi à l'intérieur duquel on incorpore des fibres, qu'elles soient métalliques, organiques ou non. On intègre ces fibres afin d'améliorer différentes caractéristiques du béton, comme sa résistance mécanique, sa capacité à réduire les microfissures (les fissures de surface qui peuvent survenir lors de durcissement du béton) et sa résistance au feu.

Dans de nombreuses applications, notamment pour les fondations ou les dalles sur terre-plein, le béton fibré peut même remplacer les armatures et treillis métalliques conventionnels, ce qui le rend extrêmement pratique et polyvalent.

Les avantages du béton fibré par rapport au bétons traditionnel incluent une meilleure résistance à la fissuration due aux charges dynamiques, une meilleure résistance aux chocs et à la traction. Il peut être utilisé dans une variété d'application, notamment la construction de ponts, de dalles, de planchers industriels, de tunnels....

Les Romains connaissaient déjà très tôt le béton, mais sa technique a été oubliée jusqu'à ce qu'elle soit réintroduite en 1756 par l'ingénieur britannique John Smeaton.

Le béton de ciment est largement utilisé depuis le XIXe siècle, notamment grâce à l'évolution du ciment Portland et à l'initiative de Louis Vicat en France. Il est encore aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé. [1]

Le pont du Jardin des plantes de Grenoble est le premier pont en béton coulé au monde, construit en 1855 par Joseph et Louis Vicat.



Figure I.1. Pont situé au jardin des plantes de Grenoble

I-2 Constituants de béton

Le béton est une matière première composée de ciment, de granulats comme le sable, le gravier et d'eau. Il est utilisé dans la construction de divers ouvrages tels que les bâtiments, les ponts, les tunnels, etc. [3]

I-2-1 Ciment

I-2-1-1 Définition

Le ciment est un matériau de liaison hydraulique fabriqué à partir du clinker broyé, qui est obtenu en combinant chimiquement le calcaire et l'argile à des températures extrêmement élevées. Ensuite, des additifs sont incorporés dans le clinker, dans des proportions extrêmement précises, ce qui confèrera au ciment des caractéristiques particulières. [4]

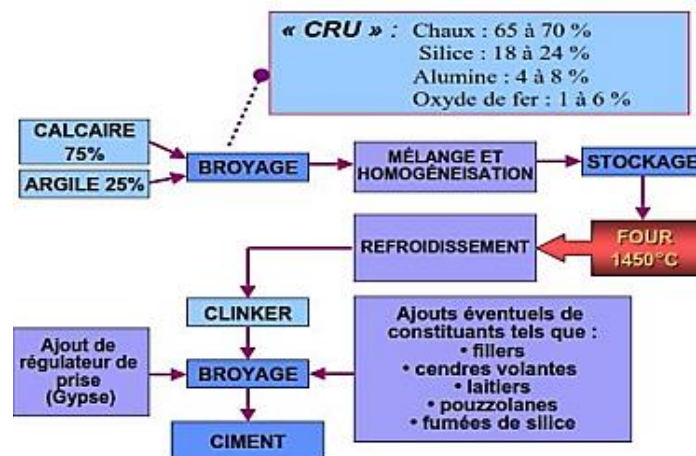
I-2-1-2 Fabrication du ciment

On fabrique les ciments en calcinant des pierres calcaires plus ou moins argileuses : Les ciments classiques sont produits en combinant environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Ce mélange est chauffé progressivement à une température d'environ 1450°C, puis rapidement refroidi. Pendant ces processus, plusieurs réactions chimiques se produisent. Le produit final est le clinker, qui est ensuite mélangé avec du gypse et parfois d'autres additifs, puis finement broyé pour obtenir le ciment.[5]



Figure I.2. Fabrication de ciment

Tableau I.1. Fabrication détaillée de ciment



I-2-1-3 Types de ciment

Les ciments sont catégorisés et étiquetés selon des appellations spécifiques en fonction de leur utilisation prévue.

- Le CEM I est le ciment classique, qui ne contient aucun composant supplémentaire. Il est utilisé pour du béton précontraint et armé, dont la résistance est recherchée.
- Le ciment CEM II est composé de composants secondaires. On l'utilise fréquemment sur des chantiers. Il convient à différents usages.

Les autres types de ciment sont plus "dilués" et contiennent des produits secondaires tels que des laitiers de haut fourneau, de la pouzzolane et d'autres produits. Ces variétés de ciment sont conçues pour des applications particulières.

- Le CEM III et V sont spécialement conçus pour les travaux de fondation et sont adaptés aux environnements agressifs. [6]

- Le CEM IV des travaux souterrains, des ouvrages pour eaux usées ou industrielles, ainsi que pour des travaux hydrauliques, souterrains, fondations, injections, ouvrages massifs, et travaux en milieu agricole.

Les ciments actuels sont classés en six catégories de résistance selon la norme NF EN 197-1, en fonction de leur résistance à la compression (résistance normale) définie dans la norme EN 1961, mesurée à 28 jours.

Tableau I.2. Classes du ciment [7]

Classe ciments	Résistance 2 jours (MPa)	Résistance minimale à 28 jours (MPa)	Résistance maximale à 28 jours (MPa)
32.5N	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5N	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5N	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5N	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5N	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5N	≥ 30	≥ 52.5	/

I-2-2 Granulats

I-2-2-1 Généralité

Les granulats sont des matériaux de faible masse volumique apparente, qu'ils soient naturels ou artificiels, qui sont employés dans la production de bétons légers. Ils peuvent être divisés en granulats naturels d'origine volcanique tels que la pierre ponce et la pouzzolane, granulats artificiels industriels tels que le mâchefer laitier expansé et les cendres volantes frittées, et granulats artificiels spécialement fabriqués tels que l'argile et le schiste expansés, le polystyrène expansé, le verre expansé, etc. Les granulats sont des roches qui se brisent et se roulent naturellement dans les cours d'eau ou mécaniquement, et qui sont utilisées dans la fabrication de mortiers et de bétons.

I-2-2-2 Différents types de granulats

Granulats naturels : d'origine minérale, provenant de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou de roches massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques...), n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (comme le concassage, le broyage, le criblage...).

[8]

Granulats Artificiels : sont des matériaux qui ont été soumis à une transformation industrielle thermique ou chimique (par exemple, le laitier, le verre, l'argile expansée, le caoutchouc, le bois, etc.).

Granulats recyclés : Les matériaux utilisés dans le domaine de la construction (comme le béton concassé, le fraisât routier, etc.) ont été précédemment utilisés.[9]

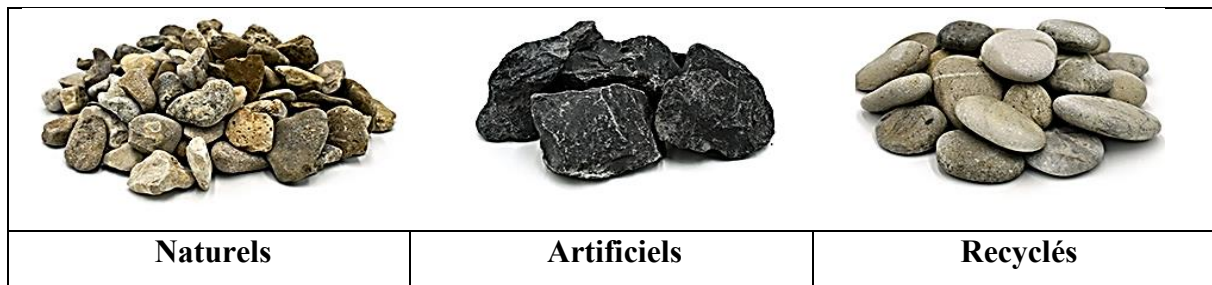


Figure I.3. Différents types de granulats [9]

I-2-2-3 Classification des Granulats

Les granulats sont, selon la norme, des grains minéraux de 0 à 125 mm, naturels ou artificiels (produits dans l'industrie). Les granularités (distribution dimensionnelle des grains) sont classées en fonction d'une analyse granulométrique. On l'exprime par le couple d/D , où « d » est la dimension moindre et « D » est la dimension plus grande. Ainsi, il est possible d'observer :

- La plupart des éléments des fillers sont passés à travers un tamis de 125 μm .
- Les sables $0/D$ avec un D inférieur ou égal à 6,3 mm
- Deux ensembles de gravillons, l'un mesurant 2 à 31,5 mm et l'autre mesurant 20 à 80 mm
- Différents types de graves $0/D$ avec des diamètres de 10, 20, 31, 5, 40, 63, et 80 mm
- En fonction des besoins des chantiers, les tout-venants $0/D$ avec D peuvent dépasser les 125 mm de la norme.[10]

I-2-3 Sables

I-2-3-1 Généralité

Le sable se compose de petites particules provenant de la désagrégation de minéraux (principalement des roches) ou organiques (coquilles et squelettes de coraux).

Selon la typologie des matériaux granulaires en géologie. Jusqu'à 180 minéraux différents peuvent être présents dans la composition du sable, dont le quartz, les micas, les feldspaths et des débris calcaires. L'utilisation du sable en tant que matériau granulaire est

répandue, notamment dans la production de béton. Il convient de souligner que le sable n'est pas une ressource renouvelable.[11] L'utilisation des sables et granulats dans le béton est régulée par des normes européennes telles que l'EN 12620 :2013. Les classes granulaires sont établies en fonction des diamètres :

- Sable fin : 0/2 mm
- Sable moyen : 0/4 mm
- Sable grossier : 0/6,3 mm [12]

Tableau I.3. Limites inférieures et supérieures du diamètre des grains et les numéros de tamis A. S. T. M [13]

Nom	Diamètre des grains	Numéro A.S.T.M des tamis
Sable grossier	>2.00 mm à <4.75 mm	Tamis 10-tamis 4
Sable moyen	>0.465 mm à <2.00 mm	Tamis 40-tamis 10
Sable fin	>0.0625 mm à <0.465 mm	Tamis 200- tamis 40

I-2-3-2 Différents constituants du sable

Le sable est principalement constitué de deux éléments :

- La silice (SiO_2), un élément réfractaire, est la principale composante du sable.
- La bentonite est utilisée comme un liant pour renforcer la cohésion du sable en utilisant un effort mécanique. L'hydratation de la bentonite favorise cette cohésion.[14]. Pour pouvoir donner une bonne description de l'aspect des minéraux lorsqu'ils sont broyés en morceaux de la taille de grains de sable, nous en avons broyés nous-mêmes, à partir d'échantillons bien identifiés. Par la suite, les grains de minéraux ont été mélangés et divisés en sable moyen (>0,465 mm et <2 mm) et sable fin (>0,0625 mm et <0,465 mm).
- Les grains de roche jouent un rôle essentiel dans la formation du sable. Étant donné que les grains de sable sont issus de la désagrégation des roches, tant qu'elles ne sont pas divisées en grains suffisamment fins pour séparer les minéraux en grains individuels, on parle de grains de roche.
- Les morceaux de fossiles peuvent jouer un rôle crucial dans la composition du sable des plages marines dans les zones tropicales. La calcite (ou aragonite) est le minéral principal qui constitue la carapace des mollusques, des coraux et des bryozoaires. La présence de silice et de phosphates d'origine organique est beaucoup moins fréquente. La détection des grains de sable calcite est aisée car ils sont effervescents en présence de chlorure d'hydrogène (HCl) et leur couleur est habituellement pâle, blanche ou de

couleur claire (jaunâtre, rougeâtre, brunâtre,). Le verre est un élément occasionnel présent dans les sables des plages marines actuelles.

- Le quartz est le minéral le plus répandu dans les sables continentaux en raison de sa présence, de sa dureté et de sa résistance aux chocs (absence de plan de clivage) lors de son transport. les sables et les grès peuvent contenir plus de 99 % de grains de quartz.
- La calcite est un minéral extrêmement répandu et qui peut même être prédominant dans la composition de certains sables de plages marines et tropicales. La calcite est issue d'une accumulation de coquillages et de coraux et de l'érosion des rochers calcaires exposés aux vagues de la mer. Le transport entraîne une érosion rapide de la calcite en raison de sa faible dureté (3) et de sa capacité à se briser selon ses trois plans de clivage. Ce minéral ne se développe qu'à partir de l'accumulation de sable dans un milieu où la calcite est accumulée etc.....

I-2-3-3 Classification des sables

Le processus de classification des sables est complexe et tient compte de divers critères techniques et géologiques. On peut classer les sables selon leur granularité, leur pureté, leur composition pétrographique et leur structure mécanique à long terme. La stabilité immédiate des sables repose sur la granularité, et une correction granulométrique peut contribuer à améliorer cette stabilité.[15]

Tableau I.4. Nature et qualité du sable [16]

SE	Nature et qualité du sable
SE <60	Sable argileux – risque ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq SE < 70$	Sable légèrement argileux – de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq SE < 80$	Sable propre – à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour des bétons de haute qualité.
SE >80	Sable très propre -l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Les recommandations concernant le béton routier, qu'il soit balayé, strié, imprimé, désactivé ou bouchardé, sont les suivantes : équivalente de sable (SE) ≥ 60 .

I-2-4 L'eau pour le gâchage

Selon la norme NF EN 1008, l'eau de gâchage est considérée comme indispensable lors de la production de béton. Le rôle de l'eau de gâchage est essentiel dans le processus de bétonnage. Avant de procéder au gâchage, il est nécessaire de mesurer le pH à 13 degrés Celsius et le degré hydrotimétrique (th). Les causes de la dangerosité d'un produit spécifique peuvent être très différentes selon sa nature de gâchage ou son eau de contact. Pour 2% des eaux, il y a des substances en suspension qui ne sont pas sensibles au gâchage. Il est essentiel de saisir l'impact des principaux sels ou autres éléments solubles ajoutés par les eaux de gâchage, car ils ont un impact sur la durée de prise ou l'apparence du durcissement des mortiers et des bétons. Il est important de prendre en compte la quantité de sels, car les effets peuvent être différents : un sel peut être un retardateur de prise à 0,2 % et devenir un accélérateur de durcissement à 2 %, voire même un accélérateur de prise à des teneurs hautes. Avant d'utiliser le ciment, il est également essentiel de réaliser des essais, car les effets peuvent différer d'un ciment à l'autre. En ajoutant des germes de cristallisation adjuvants ou non à l'eau de gâchage, les accélérateurs de durcissement peuvent être plus efficaces en ajoutant une quantité moyenne de 2% du poids du ciment. Pendant le processus de gâchage, d'autres mesures combinées, telles que l'ajout de 0,5% de l'hydroxyde de potassium (KOH) et 2% de Le chlorure de calcium (CACL₂), entraînent des augmentations de résistance remarquablement élevées à 28 jours, notamment avec les portlands. On obtient les résultats les plus positifs en ajoutant des sels tels que le sulfate de sodium et le chlorure de sodium.[17]



Figure I.4. L'eau de gâchage

I-2-5 Adjuvantes

Il est de plus en plus courant d'utiliser des adjuvants afin de modifier et d'améliorer les caractéristiques, Ils sont ajoutés à des bétons et des mortiers généralement en faible quantité

(Plus de 5 % du poids total du ciment.). Chaque additif est soumis à des critères de définition et à des exigences, comme indiqué dans la norme NF EN 934-2. Ainsi qu'à l'obtention d'une marque de qualité NF adjuvants.

Les adjuvants sont classés en trois catégories différentes :

- Les personnes chargées de modifier le temps de prise et de durcissement. Les retardateurs de capture et les accélérateurs de capture ou de rigidification sont des produits.
- Les additifs qui accroissent la résistance du matériau afin de faciliter sa mise en place. Il s'agit des plastifiants et des plastifiants extrêmes.
- Les additifs qui augmentent la capacité du matériau à résister à l'eau et au gel. Il est crucial d'avoir des hydrofuges, des antigels et des entraîneurs d'air.[18]
- L'ajout de superplastifiants est fortement recommandé pour tous les types de fibres afin d'éviter un apport excessif d'eau sur le chantier et d'augmenter la fluidité du béton avant l'insertion des fibres.

Tableau I.5. Dosage en adjuvants par apport au poids de ciment

Quelques adjuvants	Le Dosage en %
Les Plastifiants	0,15 à 1,2
Les Superplastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuges	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

I-3 Caractérisation physique des matériaux

I-3-1 Masses volumiques

Les quantités de granulats sont établies et calculées en respectant les normes suivantes : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6.[20]

- La Masse Volumique Apparente (ρ_p) : Le rapport entre la masse sèche de l'échantillon et le volume de sa matière solide, incluant les pores intergranulaires.
- La Masse Volumique Absolue (ρ_a) : La proportion de la masse sèche de l'échantillon par rapport au volume de sa matière solide (hors pores).

En général, on peut déterminer les masses volumiques de trois façons différentes en fonction de la précision désirée et de la nature du granulat :

- Le procédé d'échantillonnage progressif.
- L'utilisation d'un pycnomètre permet de mesurer la masse des particules solides par aspersion, puis de mesurer le volume à l'aide du pycnomètre.
- On utilise aussi la technique de la pesée hydrostatique pour mesurer les volumes apparents après avoir paraffiné le matériau ou le graissé.

I-3-2 Porosité (p)

La porosité fait référence à l'ensemble des espaces vides d'un matériau, qui sont remplis par des liquides ou des gaz. Principalement composés de matériaux solides, les matériaux poreux comprennent également des liquides poreux et des assemblages poreux, tels que les tas de grains ou les poudres². La porosité est aussi un élément physique qui correspond à la proportion entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux. Elle se situe entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %).[20]

I-3-3 Teneur en eau (W %)

Le rapport entre la masse d'eau de l'échantillon et la masse sèche de l'échantillon est connu sous le nom de teneur en eau.[21]

I-3-4 Taux d'absorption d'eau (AB %)

Le taux d'absorption d'eau (AB %) est la quantité d'eau absorbée par un matériau, généralement exprimée en pourcentage de la masse sèche de ce matériau

. Il est mesuré en immergeant l'échantillon dans l'eau jusqu'à ce qu'il atteigne une masse constante, puis en calculant la différence entre la masse totale et la masse sèche initiale.[22]

I-3-5 Propreté des granulats

La production est réalisée en respectant les normes « NF P 18-554, 18-555, EN 1097-3, EN 1097-6 ». La qualité des granulats utilisés pour la production de bétons est d'une importance capitale. Trois catégories d'impuretés sont présentes dans les granulats : les matières organiques, les argiles et les matériaux fins (extraits de roches par concassage ou broyage). Lorsqu'ils sont présents sur la surface des granulats, ils empêchent l'hydratation du ciment et empêchent une adhérence optimale entre les granulats et les liants, ce qui entraîne une diminution des résistances mécaniques et des variations des propriétés rhéologiques des mélanges. Ces impuretés paraissent plus présentes dans les sables que dans les gros granulats et semblent être plus facilement éliminables. [23]

I-3-5-1 Propreté des sables

Les problèmes de pollution causés par l'argile dans les sables peuvent être réduits en utilisant l'essai appelé équivalent de sable pour avoir une meilleure qualité et le bleu de méthylène pour mesurer leur importance.[21]

I-3-5-1-1 Equivalent de sable « ES »

L'équivalent de sable est le rapport volumétrique standard multiplié par 100 entre les éléments sableux et les éléments plus fins. Deux types de tests sont utilisés ; l'examen visuel et l'examen au piston [24]. Actuellement, cet essai est régi par trois textes réglementaires :

- Le sable équivalent (NFP 18-598)
- Le sable équivalent avec 10% de fines (NFP 18-597),
- L'évaluation des fines - l'équivalent de sable (EN 933-8). [25]
-

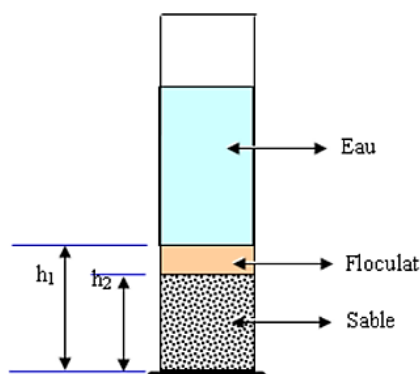


Figure I.5. Équivalent de sable

Les tests d'équivalent de sable permettent d'évaluer le taux d'éléments très fins présents dans le sable (aspect quantitatif) sans distinguer la nature « argile, limon, vase et matières solubles » (aspect qualitatif). L'essai d'équivalent de sable doit être complété par un test au bleu de méthylène pour une évaluation plus sélective de la propreté des sables. [24]

Tableau I.6. Qualité du sable

ESV (%)	ES (%)	Qualité de sable
ESV < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualités.
$65 \leq \text{ESV} < 75$	$60 \leq \text{ES} < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq \text{ESV} < 85$	$65 \leq \text{ES} \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fins argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV ≥ 85	ES > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fins argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

I-3-5-1-2 Essai au bleu de méthylène

Les fines argileuses sont plus facilement fixées par le bleu de méthylène que les fines non argileuses. La norme "NF EN 933-9" est utilisée pour effectuer l'essai au bleu de méthylène sur la fraction granulaire (0/2 mm) des sables.

I-3-5-2 Gravillons, évaluation de la propreté de la surface (p)

Les gravillons se distinguent par la quantité de particules fines, principalement argileuses ou d'origine végétale ou organique, ainsi que par le poids total d'un échantillon de gravillon [26]. Elle est établie en accord avec la norme NF P 18-591. [27]

I-4 Formulation des bétons

L'étude du mélange optimal des granulats disponibles et le dosage de ciment et d'eau sont indispensables pour la composition d'un béton dont les caractéristiques soient adaptées à la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en question. Deux types de méthodes de composition sont identifiés :

Il semble que la plupart des bétons utilisés actuellement soient de granularité continue.

I-4-1 Méthode de Dreux- Gorisse

Cette méthode française a une base empirique qui remonte à 1970. Une grande étude a été menée à Dreux pour obtenir des renseignements sur des bétons satisfaisants. [29]

Une fois que les granulaires ont été obtenus, Une méthode empirique a été mise au point pour établir une courbe granulaire de référence de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique.

L'objectif principal de cette méthode est de définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause.[28]

I-4-2 Méthode de Bolomey [30]

L'objectif est de créer une courbe granulométrique de référence en utilisant une formule adéquate, afin d'obtenir avec des granulats dont la composition granulaire totale (y compris le ciment) est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique qui est tracée.

La formule fondamentale est la suivante : $P = A + (100-A) V_d / D$.

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros granulat

A : coefficient varie entre 8 et 16 en fonction du dosage en ciment, sa valeur étant d'autant plus le dosage en ciment est élevé, plus la force est élevée. Théoriquement, cette méthode conduit au moins à une granularité constante.

I-4-3 Méthode de Faury

Une loi de granulation de type continu a été proposée par Faury en se référant à la théorie de Caquot sur la taille d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un moyen de serrage.

Une loi fonction de $5\sqrt{d}$ est exprimée par la loi de granulation. La courbe granulométrique optimale qui permet de maximiser la compacité est en théorie une courbe droite ; cependant, Faury a fait une distinction entre les grains fins et moyens ($<D/2$), les gros grains ($>D/2$) et la pente de la courbe.

La droite diffère selon chacune de ces deux catégories. Une courbe granulométrique de référence est tracée pour l'ensemble du mélange, y compris le ciment, en utilisant un graphique gradué, en abscisse, en $5\sqrt{d}$. Le point de rencontre de ces deux droites est défini comme $D/2$ et son ordonnée Y est calculé à l'aide d'une formule qui prend en compte la grosseur D du granulat et inclut certains paramètres, dont la valeur.

Il s'agit d'une valeur calculée en fonction des granulats (roulés ou concassés) et de la force de serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins forte). La formule pour calculer Y est la suivante :

$$Y = A + 17\sqrt{D} + R - 0.75 D$$

A : valeur tabulée,

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou ;

D : est exprimé en dimension de passoire ;

R : est le rayon moyen du moule.

I-4-4 Méthode de LA VALETTE

Une méthode essentiellement expérimentale a été développée par R. Valette, mais qui exige plusieurs calculs préliminaires. Cette méthode est souvent désignée sous le nom de « dosage des bétons à la plus grande densité » ou « dosage des bétons à la plus faible quantité de sable », ou encore « mesurer la granularité des bétons à discontinue ».

On utilise parfois la méthode Valette avec quelques modifications. Un béton binaire est généralement mentionné : un mélange de sable et de gravier qui présente souvent une certaine discontinuité (sable 0/5 et gravier 16/25 comme exemple).

On calcule le dosage initial de sable et de ciment pour obtenir un mortier plein avec un taux de ciment minimal. On obtient ce dosage en mesurant les espaces vides dans le sable mouillé et en calculant le dosage de ciment afin de remplir le volume des espaces vides dans le sable avec un volume égal de pâte pure de ciment.

Par la suite, on incorpore le plus de gravier mouillé possible pour assurer une ouvrabilité optimale, ce qui facilite le moulage et la mise en œuvre dans les conditions du chantier.

De cette manière, le béton est obtenu en utilisant le sable le plus faible et le ciment le moins doux. [31]

I-4-5 Méthode de Joisel

En se basant, à l'instar de Faury, sur la théorie de Caquot, mais en la généralisant, Joisel suggère que la loi de granulation qui conduit à la compacité maximale est liée à \sqrt{dm} m, qui dépend de la proportion de granulats de dimension uniforme qui se serrent selon les moyens de serrage ; m peut donc varier de 3 à 10.

Selon le serrage des matériaux, Joisel utilise la \sqrt{dm} plutôt que la \sqrt{d} 5 (Faury) ou m en abscisse. Il est donc logique, comme dans la méthode de Faury, d'atteindre une granularité continue, à moins bien sûr que les granulats dont on observe une discontinuité dans la pratique.

Toutefois, pour éviter que la droite de référence ne se brise au point d'abscisse D/2, Joisel a calculé l'échelle de l'intervalle D2 / D de façon à ne former qu'une seule et même droite. C'est là le point positif de cette méthode. Par ailleurs, un graphique dont l'échelle des abscisses diffère d'une échelle à l'autre, d'un type de granulats à un autre, est requis.

Les proportions des granulats sont ensuite calculées à l'aide d'une méthode graphique dont nous nous inspirons [Dreux et Festa, 1998]. [32]

I-5 Types et propriétés mécanique des fibres

I-5-1 Généralité

Les bétons en fibres qui sont inclus dans la norme NF EN 206/CN. En 206/CN du 19 décembre 2014, la norme NF apporte de nombreux compléments, notamment en ce qui concerne les règles d'utilisation des bétons renforcés par des fibres. Le béton fibré consiste en un matériau composite qui intègre des fibres de diverses natures (métalliques, organiques, céramiques) dans le béton classique. Ces fibres renforcent la solidité du béton et facilitent la gestion des fissures, ce qui entraîne des performances améliorées et un comportement homogène.

Lors de la formulation, il est essentiel de répartir de manière précise les fibres afin d'obtenir un mélange homogène. Le béton fibré peut être employé de diverses manières, comme préfabriqué ou projeté, et sa composition est similaire à celle du béton classique, mais avec des quantités de fibres diverses selon l'application et le type de fibres utilisé. La production et

l'application du béton fibré nécessitent une vigilance particulière afin d'assurer une distribution homogène des fibres. Les fibres ne servent pas de remplaçants des armatures structurales, mais elles améliorent les caractéristiques du béton. Selon le domaine d'utilisation et les performances désirées, le choix du type de fibres et de leur quantité varie. [33, 35]

I-5-2 Béton fibré

Le béton fibré est un matériau composé de béton traditionnel auquel ont été ajoutées des fibres de différents types.

Les fibres sont mélangées au béton lors de la formulation, dans une proportion généralement comprise entre 0,5 et 2% du volume total.

L'ajout de ces fibres améliore les performances du béton, notamment en termes de résistance à la traction, à la flexion, aux chocs, à l'abrasion, ainsi que sa ductilité et sa résistance aux fissures. Le béton fibré peut ainsi être utilisé en remplacement partiel ou total du béton armé dans de nombreuses applications, comme les dalles, planchers, revêtements de façade, etc. [34]

I-5-3 Types de fibres

I-5-3-1 Fibres d'Amiante

Les fibres d'amiante, également connues sous le nom de silicates hydratés de magnésium, sont des minéraux naturels principalement constitués de silicium et d'oxygène. La résistance au feu, à la chaleur et aux produits chimiques sont des caractéristiques exceptionnelles qui ont encouragé leur utilisation industrielle massive au 20^e siècle, en particulier dans le domaine de la construction. Elles étaient utilisées pour leur compatibilité avec la pâte de ciment, leur résistance à la traction et leur élasticité.



Figure I.6. Fibres d'amiante

Tableau I.7. Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante par AÏT AMEUR [37]

Type de fibre	Amiante
Diamètre D (mm)	0.0002 - 0.002
Longueur (mm)	5
Masse Volumique (g/cm ³)	2.6 – 3
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	100 – 300
Module d'Young E (GPa)	80 – 150

I-5-3-2 Fibres de Verre

L'utilisation des fibres de verre dans le béton est difficile en raison de leur fragilité, même si elles sont commercialisées sous forme pratique de bobines ou de fils coupés, en raison de l'action corrosive des alcalis du ciment. Sur le long terme, cette corrosion a un impact sur les fibres de verre, ce qui entraîne une réduction des caractéristiques mécaniques du béton et la création de microfissures. Grâce à des études, il a été possible de créer une nouvelle génération de fibres de verre, connue sous le nom de "type S". L'utilisation de ces fibres permet d'augmenter la résistance aux alcalis, ce qui ouvre de nouvelles opportunités pour renforcer le béton.

**Figure I.7.** Fibres de verre**Tableau I.8.** Quelques caractéristiques des fibres de verre [37]

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique ? (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

- (E) : le verre ordinaire ;
 (R) : le verre résistant à la corrosion ;
 (S) : le verre résistant aux alcalis.

I-5-3-3 Fibres de Carbone

La fibre de carbone est un matériau composite composé de filaments très fins, principalement constitués de carbone. Leur légèreté, leur grande résistance, leur conductivité électrique, leur résistance thermique exceptionnelle et leur faible coefficient de dilatation thermique sont des caractéristiques qui les distinguent.



Figure I.8. Fibres de carbone

Tableau I.9. Quelques propriétés des fibres de carbone [37]

Type de carbone	H. R	H.M
Diamètre D (mm)	8	8
Masse Volumique ? (g/cm ³)	1.75	1.81
Résistance à la rupture S_{fu} (MPa)	3000 – 5000	2800
Module d'Young E(Gpa)	220	400

I-5-3-4 Fibres Polymères

Les fibres polymères provenant du plastique sont classées en trois grandes catégories :

Polyamide 6.6 (PA6.6) :

- La plus grande famille de plastique en termes de volume.
- Une résistance élevée aux acides minéraux.

Polychlorure de vinyle (PVC) :

- On obtient un thermoplastique en polymérisant du chlorure de vinyle.
- La résistance aux acides et aux alcalis.

Polypropylène (PP) :

Thermoplastique constitué de chaînes linéaires de motifs propylènes (homopolymère) ou d'une combinaison de motifs propylène et éthylène (copolymères).

- Bonne résistance aux alcalis et aux acides.



Figure I.9. Fibres polymère

Tableau I.10. Caractéristiques mécaniques des fibres de polymère [38]

Type de polymère	Référence	Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte à la traction (MPa)
PA6.6	Rhône-Poulenc A 218	3	90
PVC	PVC rigide de Solvay	2.5	50
PP	RY6100 de Shell	5	40

I-5-3-5 Fibres d'acier

Les fibres d'acier jouent un rôle essentiel dans la résistance des bétons et des mortiers. Elles sont caractérisées par :

- Une résistance remarquable à la traction : supérieure à celle des fibres de verre ou de carbone, ce qui réduit la fissuration et renforce la résistance du matériau.
- Une grande résistance aux chocs : similaire à celle du béton, garantissant une meilleure répartition des charges et une résistance accumulée aux chocs et aux vibrations.[38]

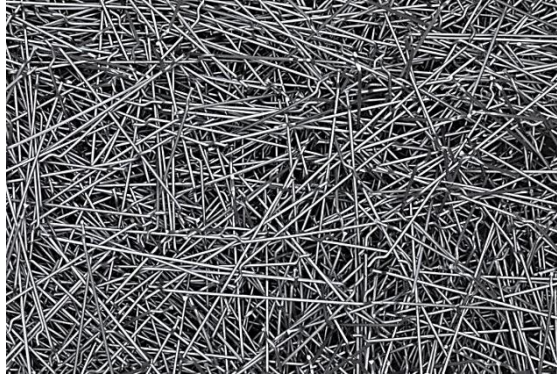


Figure I.10. Fibres d'acier

Les fibres d'acier les plus couramment employées sont :

- Les fibres Euro-Steel : présentent une ondulation, une grande résistance, une faible teneur en carbone et une résistance à la traction de 1400 MPa. [36]
- Chez Dramix, les fibres Bekaert sont triées et disposées en plaquettes pour faciliter leur incorporation, avec une résistance à la traction minimale de 1100 MPa. [36.39].
- Fibres Harex : Les résistances à la traction obtenues par fraisage sont d'environ 700 MPa. [36]
- Fibres d'encrage en acier tréfilé : Créées par EURO-STEEL, offrant un ancrage optimal et un confinement du béton. [36]
- Fibres de Beki-Shield : Fibres métalliques spéciales, fines, moins abrasives, haute résistance à la corrosion. [38]

I-5-4 Propriétés des bétons de fibres

Les bétons fibrés, qui sont légers et simples à utiliser et à manipuler, ont des caractéristiques et des propriétés variées en fonction des fibres qui sont incluses dans leur composition :

I-5-4-1 L'ajout des fibres métalliques

Telles que la fonte, l'acier ou l'inox, dans la composition du béton confère à ce matériau des propriétés remarquables :

Résistance à la fatigue : Le béton métallique fibré est capable de supporter des charges multiples sans se détériorer, ce qui le rend parfait pour les structures qui sont victimes de vibrations ou qui subissent des cycles de chargements et de déchargements.

Résistance à la flexion : Le béton en métal fibré présente une résistance supérieure à la flexion par rapport au béton classique, ce qui permet de concevoir des structures plus fines et plus raffinées.

Résistance à la traction : L'ajout de fibres métalliques augmente considérablement la capacité du béton à résister à la traction, et aux fissures et aux ruptures.

Résistance à la déformation : présente une résistance supérieure à celle du béton traditionnel, ce qui implique qu'il peut se déformer avant de se briser, absorbant ainsi l'énergie des chocs et des impacts.

I-5-4-2 L'ajout de fibres organiques

Telles que l'acrylique, le carbone, le kevlar ou le polypropylène, dans le béton lui confère des propriétés uniques :

Fibres souples : Les fibres organiques, qui sont plus flexibles que les fibres métalliques, favorisent une meilleure maniabilité du béton frais, ce qui facilite sa mise en place.

Réduction de la fissuration : Les fibres organiques aident à limiter la formation de microfissures au jeune âge du béton, en raison de leur capacité à absorber les tensions internes.

Durabilité accrue : Le béton fibré organique peut être plus résistant aux produits chimiques et à l'abrasion que le béton traditionnel, en fonction du type de fibre utilisé.

Résistance à l'impact : Le béton fibré organique peut offrir une meilleure résistance aux chocs et aux impacts que le béton traditionnel.

Légèreté : Le béton fibré organique peut être plus léger que le béton traditionnel, ce qui peut être un avantage pour certaines applications.

Résistance au feu : Le béton fibré organique est généralement moins résistant au feu que le béton fibré métallique. La plupart des fibres organiques perdent leurs propriétés à des températures supérieures à 170°C.

Coût : Le béton fibré organique peut être plus cher que le béton traditionnel, en fonction du type de fibre utilisé.

I-5-4-3 L'ajout de fibres minérales

Telles que le verre, le basalte ou le mica, dans le béton lui confère des propriétés remarquables :

Fibres minérales : Les fibres minérales sont naturellement résistantes aux températures élevées et peuvent supporter des températures allant jusqu'à 800°C, voire plus.

Isolation thermique : Les fibres minérales améliorent l'isolation thermique du béton, ce qui permet de réduire les pertes de chaleur et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

I-5-4-4 L'ajout des fibres

Les fibres ajoutées au béton peuvent remplacer partiellement ou totalement les armatures en ferraille, simplifiant ainsi la mise en œuvre et réduisant le temps de construction.

Facilité de travail :

Le béton fibré est plus facile à manipuler et à installer que le béton traditionnel, ce qui facilite le travail des ouvriers sur le chantier.

Gain de temps et d'argent : La diminution des besoins en ferrailage et la simplification de la mise en place permettent de diminuer les dépenses et les délais de construction.

I-5-4-5 Evolution de la résistance à la compression du béton fibré

Le béton fibré présente une résistance à la compression similaire à celle du béton ordinaire.

- 70% de la résistance totale est atteinte dès 7 jours.
- La résistance finale est atteinte après 28 jours.
- La résistance à la compression du béton fibré après 28 jours est généralement plus élevée que celle du béton ordinaire, avec des valeurs comprises entre 20 et 40 MPa.

I-5-4-6 Résistance à l'abrasion du béton fibré

La résistance à l'abrasion du béton fibré est plus élevée que celle du béton ordinaire, en raison de la présence des fibres, qui :

- Résistent à l'usure causée par les frottements répétés.
- Limitent la propagation des fissures et l'éclatement du béton. [40]



Figure I.11. Fibres présentes dans le béton fibré

I-5-6 Application des bétons de fibres

Le béton contenant des fibres polypropylènes peut être employé pour les dalles et les fondations de type plancher, ainsi que dans les zones urbaines et les travaux industriels (aménagements de voirie, dallages). Il est également possible d'utiliser des fibres pp pour renforcer les caractéristiques techniques lors de la réparation ou du scellement de mortier. Il existe plusieurs méthodes d'application :

- Le béton est projeté de manière sèche ou humide pour renforcer des parois ou des constructions.
- Le béton coulé est utilisé pour fabriquer des revêtements solides tels que des dalles, des planchers, des fondations et des chapes. On peut procéder à la coulée du béton renforcé de fibres pp de différentes façons : soit à l'aide d'un camion toupie, soit avec une bétonnière.
- Un mortier en béton fibré est utilisé comme enduit de réparation.[42]

Tableau I.11. Exemple d'application de béton fibré [41]

Familles de fibres	Exemples d'application
Fibres métalliques	Pieux forés Bétons projetés Structures assorties de difficultés techniques (soumission sismiques, géométries complexes...) Dallages
Fibres organiques	Aménagements et dallages urbains Bétons et mortiers projetés Parements
Fibres minérales	Panneaux de façade minces Bardages, éléments décoratifs Mobilier urbain Assainissement Coffrages

I-5-7 Exemple d'application réel de béton fibré

I-5-7-1 Béton fibré dans un tunnel

Le 19 février 2019, la Société du Grand Paris a déclaré que les 11 km de tunnel du lot 2 de la ligne 16 du Grand Paris express (GPE) seront construits en béton fibré et non armé. La société Salinie Impregilo prévoit d'installer ce béton sur le chantier en 2020, avec des caractéristiques techniques, économiques et écologiques novatrices.



Figure I.12. Tunnel en paris

I-5-7-2 Nouveau pont ferroviaire entièrement en CFUP [43]

Le pont de l'Aiguillon est un pont ferroviaire à auge et à voie étroite entièrement en composite cimentaire fibré ultra performance (CFUP) construit et mis en service en 2021 sur la ligne ferroviaire TRAVYS entre Yverdon-les-Bains et Sainte-Croix (VD).

Le succès de ce projet pilote confirme l'aptitude du CFUP à concevoir des œuvres d'art plus légères et plus résistantes que leur précédente version en béton structuré.



Figure I.13. Le nouveau pont ferroviaire de l'Aiguillon, réalisé en CFUP armé (Gruner)

Conclusion du chapitre

Les bétons fibrés, également appelés bétons renforcés de fibres, offrent une résistance mécanique supérieure grâce à l'ajout d'armatures métalliques, minérales ou organiques. Les fibres jouent un rôle crucial en reprenant les efforts de traction ne pouvant être repris par le béton pur, ce qui permet de maîtriser la fissuration et d'améliorer la durabilité des structures. En outre, les bétons renforcés de fibres ont un meilleur comportement au feu que le béton armé. Il

est important de prendre en compte les types de béton, les dosages en fibres et les caractéristiques mécaniques et physiques pour garantir une utilisation optimale du béton Renforcé de fibres dans diverses applications.

Chapitre II

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LA FLEXION DES POUTRES

II-1 Introduction

Au 18^e siècle, des chercheurs tels que Leonhard Euler et Louis Marie Henri Navier ont approfondi la théorie des poutres et élaboré les équations fondamentales régissant leur comportement sous charge. Ils ont notamment introduit des concepts essentiels comme le moment de flexion, la contrainte de cisaillement et la flèche de la poutre. Au 19^e siècle, la théorie des poutres a connu des avancées significatives grâce aux travaux de chercheurs comme Adhémar Jean-Claude Barré de Saint-Venant, qui a analysé en détail les contraintes internes des poutres. La révolution industrielle a également favorisé les progrès de cette théorie, essentielle pour la conception des structures en acier et en béton. Tout au long du 20^e siècle, la théorie des poutres a évolué grâce à l'introduction de méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis, permettant une analyse plus approfondie du comportement des poutres sous différentes conditions de charge et de support. De nos jours, la théorie des poutres demeure un outil essentiel dans les domaines du génie civil, de la mécanique et de l'aéronautique pour concevoir et analyser les structures. [44]

Dans le domaine de l'ingénierie structurelle, la flexion des poutres est une notion essentielle qui joue un rôle crucial dans la conception et l'analyse des structures. En tant qu'éléments structurels indispensables, les poutres sont soumises à des charges qui provoquent des déformations considérables, principalement sous forme de flexion. Il est crucial de comprendre le processus de flexion des poutres afin d'assurer la stabilité, la sécurité et l'efficacité des structures dans diverses applications, telles que les bâtiments, les ponts et les constructions industrielles.

La flexion d'une poutre est la courbure causée par les forces appliquées et peut être déterminée par divers facteurs tels que la forme de la poutre, la nature des charges appliquées, et les caractéristiques des matériaux qui la composent. Comprendre ces interactions complexes est fondamental pour développer des structures capables de supporter les charges de manière efficace, tout en minimisant les déformations indésirables. La théorie des poutres examine comment les poutres réagissent sous diverses sollicitations, telles que la flexion.

Les poutres jouent un rôle important dans les domaines de l'ingénierie et de la construction. On les décrit comme des structures allongées, habituellement droites, recevant principalement des charges dans une direction perpendiculaire à leur axe longitudinal. À leurs extrémités,

les poutres peuvent être encastrées, simplement appuyées ou doublement appuyées et elles transmettent les charges qu'elles supportent aux appuis. Plus précisément, les poutres sont des éléments de forme linéaire qui sont principalement résistants aux forces de flexion.



Figure II.1. Poutre en béton.

II-2 L'équilibre des poutres

Les caractéristiques géométriques et mécaniques des poutres jouent un rôle crucial dans leur équilibre et la manière dont elles supportent les charges appliquées. Parmi les paramètres essentiels, on compte la section transversale, le pourcentage d'armatures, la qualité de l'exécution et de la mise en œuvre, ainsi que le rapport entre les charges permanentes et les charges totales. Il est essentiel d'examiner attentivement la propagation des fissures dans les poutres en matériaux fragiles tels que l'acier ou la fonte. On peut employer la méthode statique afin d'analyser l'équilibre critique de ces poutres fissurées, en prenant en compte diverses formes de fissures (rectilignes ou circulaires). Pour les poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites ou des fibres, il est possible de prévoir leur chargement de ruine en utilisant une méthode de calcul à la rupture. Selon cette approche, les poutres sont perçues comme des structures complexes comprenant du béton, de l'acier et du composite. [45]

II-3 Les différents types des poutres

II-3-1 Les poutres isostatique

Les poutres isostatiques sont des poutres pour lesquelles le calcul des réactions d'appui et des efforts internes peut être réalisé uniquement à partir des équations de l'équilibre statique. Cela facilite considérablement leur dimensionnement et leur analyse. De manière générale, il est préférable de concevoir des poutres isostatiques ; néanmoins, celles-ci peuvent subir des flèches plus importantes lorsqu'elles sont chargées.

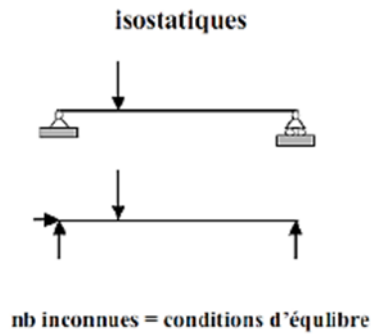


Figure II.2. Poutre isostatique.

II-3-1-1 Poutres simplement appuyée

Sont des poutres qui sont supportées à chaque extrémité de manière à permettre une rotation libre sans mouvement vertical. Ainsi, aucun moment de flexion ne se produit aux appuis, mais des réactions verticales subsistent. Ce type de support est fréquemment utilisé dans la conception des structures et des ponts.[46]

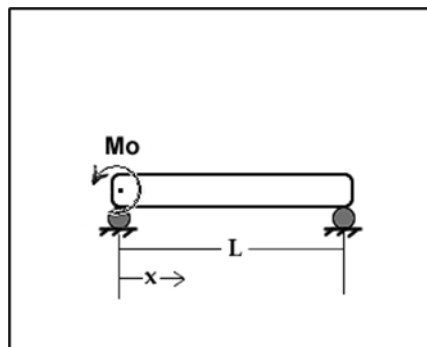


Figure II.3. Poutres simplement appuyées.

II-3-1-2 Poutre doublement appuyée

Les poutres doublement encastrees sont fixées de manière rigide à leurs deux extrémités, empêchant toute rotation. Par conséquent, les extrémités de la poutre subissent des moments de flexion non nuls, ce qui entraîne une déformation spécifique. En général, les poutres doublement encastrees sont plus rigides que les poutres simplement appuyées.

II-3-2 Les poutres hyperstatique

Les poutres hyperstatiques sont statiquement indéterminées, avec des appuis qui empêchent la rotation libre des extrémités. Cela induit des moments de flexion non nuls aux appuis, rendant leur dimensionnement plus complexe. Cependant, les poutres hyperstatiques offrent généralement une meilleure rigidité et de plus faibles flèches sous chargement. [47]

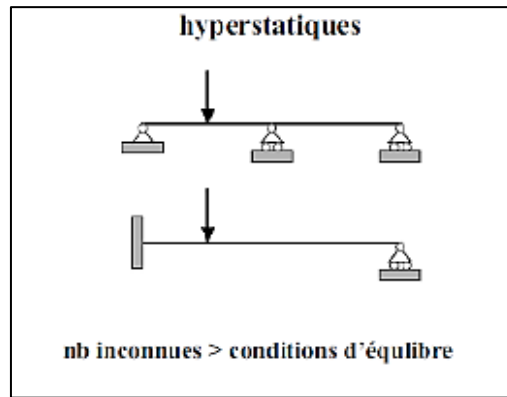


Figure II.4. Poutre hyperstatique.

II-3-2-1 Les poutres continues

Les poutres continues sont des composants structuraux qui sont exploités sur plus de deux supports simples inamovibles. Les charges qu'elles subissent sont verticales et leurs réactions d'appui sont également verticales. Les poutres continues ont un nombre d'inconnues hyperstatiques égal au nombre d'appuis intermédiaires. Afin de résoudre les poutres continues, il est essentiel de considérer des méthodes particulières comme la méthode des forces ou la méthode des déplacements. Ces approches offrent la possibilité de mesurer les efforts internes supplémentaires, tels que les moments de flexion et les réactions d'appui. Ainsi, les poutres continues sont hyperstables, ce qui nécessite des méthodes de calcul spécifiques pour résoudre de manière efficace leurs comportements structuraux. [48]

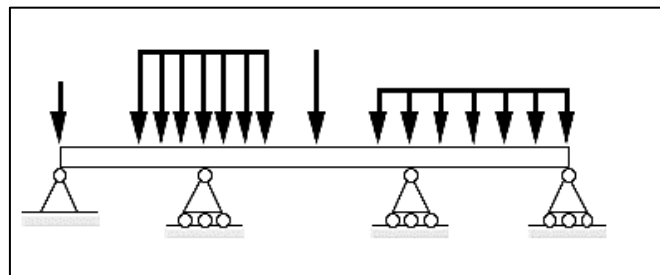


Figure II.5. Les poutres continues.

II-3-2-2 Les poutres consols

Les poutres en porte-à-faux, ou en console, sont supportées uniquement à une extrémité. Elles subissent des contraintes verticales et présentent des réactions d'appui spécifiques. Les poutres en console sont des structures isostatiques, à la différence des poutres continues, ce qui facilite leur résolution. En construction on utilise fréquemment des poutres en console pour réaliser des porte-à-faux, des balcons ou des auvents. Il est essentiel que leur conception prenne

en considération les efforts de flexion considérables causés par les charges appliquées à l'extrémité libre. [49]

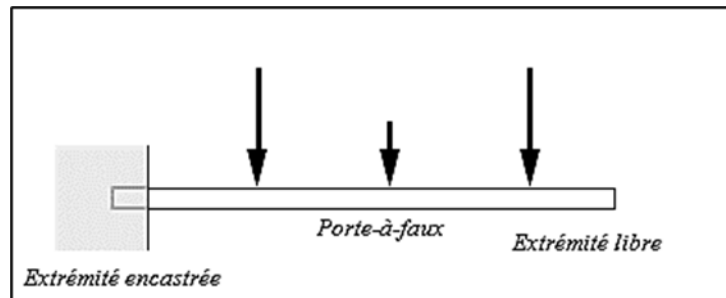


Figure II.6. Les poutres consols.

II-4 Théorie de flexion

II-4-1 Définition de flexion

La flexion des poutres fait référence à la déformation d'une poutre lorsque le système des forces extérieures se réduit à un système plan et que toutes les forces sont perpendiculaires à la ligne moyenne de la poutre. Cette déformation est mesurée par la flèche, qui correspond à la distance entre la surface neutre de la poutre non déformée et celle de la poutre déformée à un point. La résistance à la déformation d'une poutre est mesurée par l'essai de flexion d'une poutre. On utilise la flexion « trois points » ou « quatre points ».

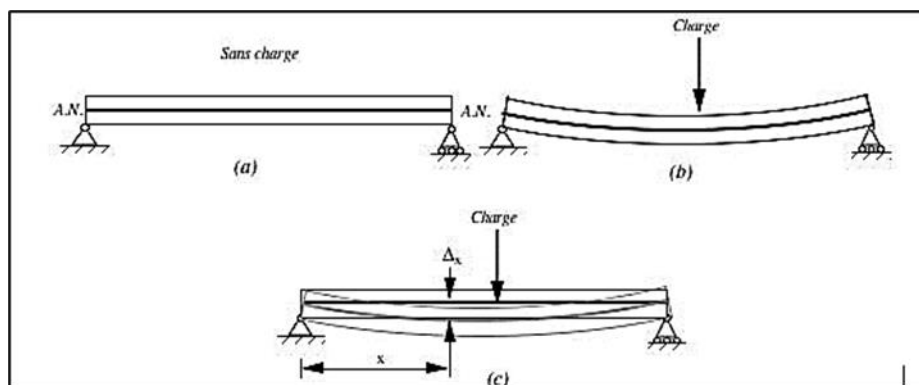


Figure II.7. Théorie de flexion.

II-4-1-1 La flexion trois points

La flexion trois points implique l'application d'une charge ponctuelle au centre d'une poutre qu'on appuie simplement sur ses deux extrémités. Grâce à cette méthode, il est possible d'évaluer le module d'élasticité en flexion ainsi que la résistance en flexion du matériau examiné. [50]

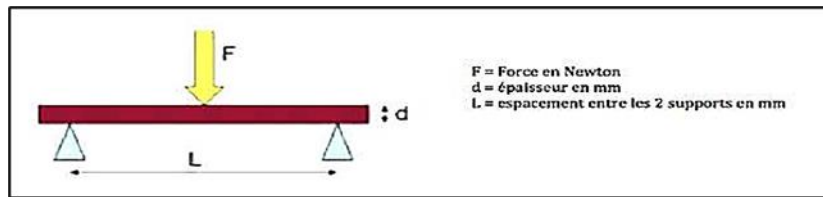


Figure II.8. Flexion trois points.

II-4-1-2 La flexion quatre points

La flexion à quatre points impose des charges en deux points distincts situés entre les appuis. Cette configuration engendre une région de moment fléchissant constant entre les deux points de chargement. Cette caractéristique permet de simplifier l'analyse du comportement du matériau sous contrainte, facilitant ainsi l'étude de sa stabilité face aux charges appliquées. [50]

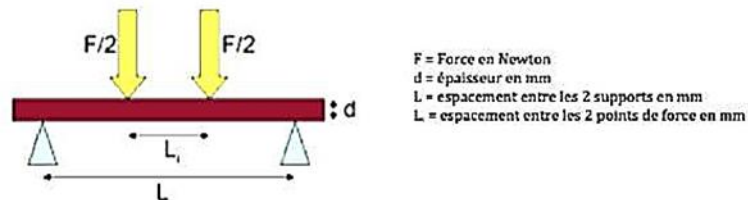


Figure II.9. Flexion en 4 points.

II-4-2 L'importance de la théorie de flexion des poutres

La théorie de la flexion des poutres est fondamentale dans le domaine du génie civil et de la mécanique. Elle permet de comprendre le comportement des poutres soumises à des charges, notamment les déformations induites par la flexion. L'intensité de la flèche d'une poutre est déterminée par sa rigidité en flexion sous un chargement spécifique. Cette théorie est essentielle pour la conception et l'analyse des structures, car elle permet de prédire les déformations et les ruptures des poutres sous charge, garantissant ainsi la sécurité et la performance des structures.

Elle est également utilisée pour évaluer les contraintes et les déformations dans les matériaux composites. En résumé, comprendre le comportement des structures soumises à des charges et garantir leur intégrité et leur sécurité repose sur l'application rigoureuse de cette théorie. Cela permet d'assurer une conception précise et fiable, ainsi que de prévenir les défaillances structurales.

II-4-3 L'effet de la fibre neutre sur les poutres

La fibre neutre, également connue sous le nom de fibre médiane ou de fibre neutre de flexion, est la fibre de la poutre qui n'est pas soumise à une contrainte de traction ou de compression lorsqu'elle est soumise à une charge de flexion. Lorsqu'une poutre est soumise à une charge de flexion, les fibres situées au-dessus de la fibre neutre sont soumises à une contrainte de compression, tandis que les fibres situées en dessous de la fibre neutre sont soumises à une contrainte de traction.

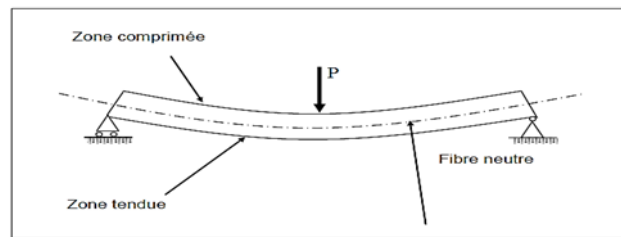


Figure II.10. "Essai de flexion trois points sur béton."

II-4-3-1 Déformation

Pendant la déformation d'une poutre les sections planes perpendiculaires à la fibre moyenne restent planes et perpendiculaires à la fibre moyenne, selon l'hypothèse de Bernoulli :

- La fibre neutre ne s'allonge pas.
- Les fibres situées à l'extérieur de la courbure s'allongent. [51]

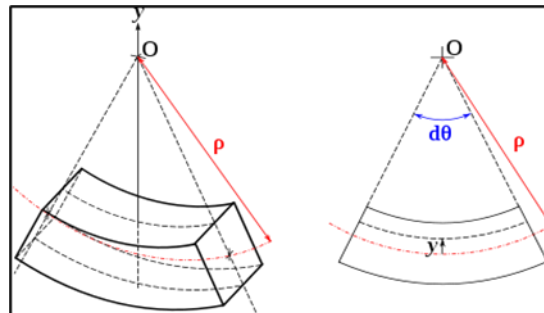


Figure II.11. Déformation d'une poutre.

II-4-3-2 Efforts de cohésion

Efforts de cohésion jouent pour la poutre le même rôle que la contrainte pour le matériau. Ils représentent, qualifient et quantifient la façon dont la poutre est sollicitée dans une section particulière. Le calcul des efforts de cohésion est une étape nécessaire au dimensionnement ou à la vérification d'une poutre.

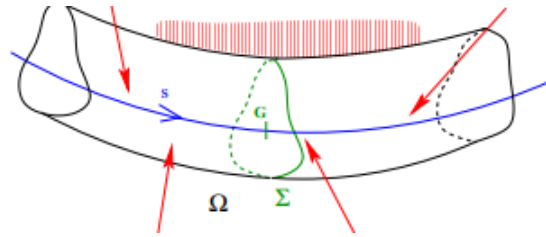


Figure II.12. Les composantes du torseur de cohésion.

II-4-3-3 Contraintes

II-4-3-3-1 Contrainte normale pour une poutre droite

Considérons une analyse structurale d'une poutre sous l'action d'un moment fléchissant positif Mfz . Les fibres de la poutre, situées dans le plan (Gxy) , présentent une disposition concentrique autour d'un centre O localisé en partie supérieure. Si le rayon des fibres évolue de manière linéaire en fonction de l'abscisse y , une étude permet de caractériser la variation de la contrainte normale σ à travers la profondeur de la section.

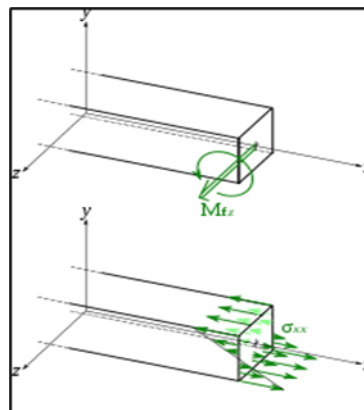


Figure II.13. Moment de flexion et distribution de la contrainte.

II-4-3-4 Cisaillement

En général, le moment fléchissant est associé à un effort tranchant (T_y avec Mfz , T_z avec Mfy), générant ainsi des contraintes de cisaillement (τ_{xy} pour T_y et τ_{xz} pour T_z). Selon le modèle de Bernoulli, ces contraintes de cisaillement ne présentent qu'un faible risque de rupture et sont donc négligées. Il n'y a pas de répartition homogène des contraintes : la contrainte sur une surface libre est inévitablement dans le plan de la surface, ce qui signifie sur les faces extérieures est nul. L'approche de la fibre neutre entraîne une augmentation de la contrainte de cisaillement. On peut donc représenter la limite de contrainte par :

- Poutre de section rectangulaire pleine : $T_{max} = \frac{3}{2} \times \frac{T}{S}$

L'équation ci-dessus montre que dans ces cas, la contrainte de cisaillement est 1,5 à 2 fois plus grande que dans le cas du cisaillement simple, où S est l'aire de la section droite. Notons que la cession est la plus grande lorsque la contrainte normale est nulle (à la fibre neutre) et la plus faible lorsque la contrainte normale est nulle (sur les faces externes). La collaboration entre ces deux types de contraintes n'est donc pas possible. [51]

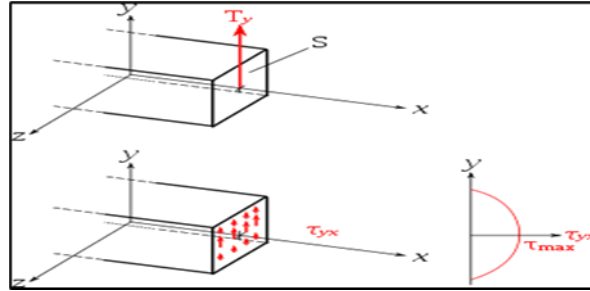


Figure II.14. Effort tranchant dans le cas de la flexion Simple.

II-4-4 Comportement des structures

L'étude du comportement des structures implique l'analyse de l'interaction entre les matériaux constitutifs et les forces appliquées à ces structures. Cela inclut l'évaluation des effets des charges statiques, dynamiques et thermiques, ainsi que l'impact du feu et des événements exceptionnels. Cette analyse est cruciale pour garantir la performance, la sécurité et la durabilité des structures sous diverses conditions de charge.

- Comportement des structures anciennes
- L'analyse du comportement des structures exposées au feu est essentielle pour la conception des bâtiments et des installations destinées à résister aux incendies.
- Le comportement des structures de bâtiment face à des événements exceptionnels, comme des tremblements de terre ou des ouragans, est étudié afin d'améliorer la résistance des constructions face à ces perturbations.
- L'utilisation de techniques optiques permet de suivre le comportement des structures aéronautiques, comme des panneaux auto-rigides, afin de valider des concepts et de mesurer des déformations.

II-4-5 Conception efficace des structures

Un domaine essentiel est la conception efficace des structures, qui intègre des techniques et des outils pour améliorer différents aspects de la conception, tels que la diminution des niveaux vibratoires, l'efficacité énergétique, l'optimisation des matériaux et la réduction des

coûts de production. Différentes méthodes sont employées afin d'atteindre une conception optimale :

Trou Noir Acoustique (TNA) : permet de diminuer les niveaux de vibration des structures sans augmenter leur masse. L'effet TNA, qui consiste à amincir localement la structure revêtue d'un matériau viscoélastique, permet d'augmenter l'amortissement global en appliquant une forte sollicitation sur le revêtement, ce qui est particulièrement efficace en haute fréquence. [52]

La conception énergétique efficace : nécessite l'intégration de l'efficacité énergétique et des contraintes écologiques dès les premières étapes du processus. Il est possible d'utiliser à des méthodes d'optimisation mono-objectif pour le dimensionnement contraint en optimisant des objectifs écologiques tels que la quantité de matériau utilisé et l'efficacité. Le concept de « front de Pareto » permet de trouver les meilleures solutions entre des objectifs écologiques contradictoires. [53]

Optimisation globale des structures métalliques : L'optimisation globale des structures métalliques vise à améliorer la performance et l'efficacité des structures tout en minimisant les coûts et l'impact environnemental. Cette optimisation prend en compte plusieurs critères tels que la résistance, la rigidité, le poids, le coût des matériaux, et les contraintes de fabrication. [54]

Conception de Structures Composites : La méthode de réanalyse statique est une technique d'évaluation des structures qui permet de déterminer les réponses de la structure modifiée (déplacements, contraintes, déformations) en utilisant les résultats de l'analyse initiale de la structure non modifiée. Cette méthode repose sur la notion que les modifications locales dans une structure ont des effets relativement confinés, permettant ainsi une réévaluation rapide et efficace sans une nouvelle analyse complète. [55]

II-4-6 Optimisation des matériaux

Les recherches présentent diverses améliorations des matériaux, en mettant en avant des méthodes innovantes pour développer des structures et des matériaux performants. Voici une synthèse des éléments clés abordés dans les sources fournies :

Optimiser la forme des matériaux architecturés : on utilise la méthode des lignes de niveaux afin de produire des matériaux architecturés qui possèdent des caractéristiques thermoélastiques spécifiques. L'approche examine également l'impact des interfaces avec un gradient de propriétés sur les architectures obtenues, tout en tenant compte des méthodes de fabrication additive et des contraintes liées à ces méthodes. [56]

Les matériaux méso structurés et l'infiltration métallique : L'étude se focalise sur la création de matériaux métalliques hybrides comprenant un squelette architecturé optimisé. On y présente un modèle de génération de structures treillis périodiques et quasi périodiques, ainsi que l'analyse des performances mécaniques et de l'infiltration d'un réseau poreux par un liquide, dans le but d'optimiser le squelette. [57]

La Conception et l'Optimisation des Structures Tissées Interlock : Les recherches se concentrent sur la compréhension du comportement des tissus 3D interlocks chaines lors des étapes de conception et de consolidation de pièces en matériaux composites robustes. Il s'agit d'améliorer les structures à la fois au niveau local et global afin d'améliorer la qualité des pièces composites finales destinées à différentes fonctionnalités. [58]

Construire et Améliorer les Matériaux et Structures Composites pour des Applications Navales : On étudie l'interaction entre le fluide et la structure afin de concevoir de manière optimale des structures marines. On privilégie l'emploi de structures composites dans les projets de construction destinés aux applications marines et aérospatiales en raison de leurs caractéristiques mécaniques bénéfiques, comme un rapport rigidité/poids intermédiaire. [59]

Optimiser le processus de dimensionnement thermomécanique : A pour objectif de présenter un nouveau moyen de transformation pour la fabrication de structures composites de haute performance à base de fibres continues et de résines thermoplastiques. Ce dispositif, qui repose sur les technologies Heat & Cool, offre des diminutions notables de la consommation d'énergie et des délais de production. [60]

II-4-7 Analyse de la sécurité et de la durabilité

Il est primordial de considérer la sécurité et la durabilité des structures dans le domaine du génie civil. Selon les données de recherche présentées, une approche rigoureuse et méthodique est nécessaire pour garantir l'intégrité structurelle et la longévité des ouvrages. Les études mettent en lumière l'importance de l'intégration des normes de sécurité strictes et des pratiques de conception durable pour optimiser la performance des structures tout en minimisant leur impact environnemental.

- La sécurité routière repose sur la conception géométrique des infrastructures routières, car elle a un impact direct sur le comportement des utilisateurs et la dynamique des véhicules. Des méthodes telles que la « Vision Zéro », qui cherche à créer des voies qui pardonnent les erreurs humaines, constituent une avancée significative dans cette direction. [61]

- Les armatures de précontrainte dans les ouvrages en béton précontraint, tels que les ponts, peuvent être sérieusement menacées en termes de sécurité et de durabilité. Il est donc primordial de saisir et de maîtriser cette maladie afin de garantir la pérennité de ces structures. [62]
- Il est essentiel de prendre en considération les mécanismes d'endommagement des matériaux composites lors du dimensionnement des réservoirs de stockage de gaz sous haute pression afin d'assurer leur sécurité et leur longévité. [63]
- En règle générale, l'étude de la fiabilité des structures vieillissantes, en mettant en évidence les facteurs influents tels que les variables aléatoires, permet d'améliorer la maintenance et de réduire les risques de défaillance. [64]
- Finalement, il est essentiel de réaliser une durabilité globale des filières biosourcées, en prenant en compte les aspects sociaux, environnementaux et économiques, afin de garantir la durabilité de ces nouvelles filières. [65]

II-5 Etat de comportement des poutres renforcés par des fibres

Revue de littérature

➤ Une étude expérimentale et analytique réalisée par **S. Kermiche et B. Redjel** a examiné le comportement en flexion de poutres en béton armé renforcées par un matériau composite en fibre de carbone (CFW) [66]. Onze poutres en béton, présentant un niveau de renforcement allant de sous-renforcées à moyennement renforcées, ont été soumises à des essais, ainsi que quatre poutres pré-fissurées et renforcées avec des bandes en forme de U de différentes dimensions. Les résultats ont démontré que la pré-fissuration et le renforcement ont conduit à une amélioration de la résistance ultime des poutres. Des modèles analytiques ont été utilisés pour estimer les résistances ultimes, et ces estimations ont été en étroite concordance avec les résultats expérimentaux. Cette étude apporte ainsi une contribution significative à la compréhension du comportement des poutres renforcées par des matériaux composites. L'expérimentation a été réalisée selon le protocole suivant :

Pour réaliser leur étude, Cinq poutres initiales ont été conçues conformément aux normes BAEL 91, avec la poutre P2 sélectionnée comme référence. Cette dernière a été réduite d'un tiers pour créer six poutres plus petites, préservant ainsi son comportement structurel. Trois niveaux de renforcement ont été définis, à savoir non renforcées, insuffisamment renforcées et moyennement renforcées. Des essais de flexion ont été menés sur ces poutres, certaines ayant été pré-fissurées, renforcées et rechargées avant les tests. Les essais ont été réalisés sur des machines

hydrauliques appropriées, adaptées aux spécificités des poutres et de leurs modèles réduits (voir tableau ci-dessous).

Tableau II.1. Détails des éprouvettes

Poutres de (13*20*120) cm ³	Poutres	Armatures	Taux de renforcement	Renforcement en TFC	Préfiissuration	Mode de renforcement
Poutres de (13*20*120) cm ³	P1	3HA8	0.66	1 pli	oui	a
	P2	3HA12	1.45	3 plis	oui	b
	P3	3HA8	0.66	1 pli	non	a
	P4	3HA8	0.66	/	non	/
	P5	/	/	/	oui	/
Poutres modèles réduits	P6	2ø5	1.45	/	non	/
	P7	2ø5	1.45	/	oui	/
	P8	2ø5	1.45	1 pli	oui	b
	P9	2ø5	1.45	1 pli	oui	c
	P10	2ø5	1.45	1 pli	oui	d
	P11	/	/	1 pli	oui	a

Les résultats ont montré que la charge de la poutre P5 a présentée deux phases de déflexion linéaire : premièrement, un comportement élastique ; deuxièmement, l'altération du matériau jusqu'à la rupture.

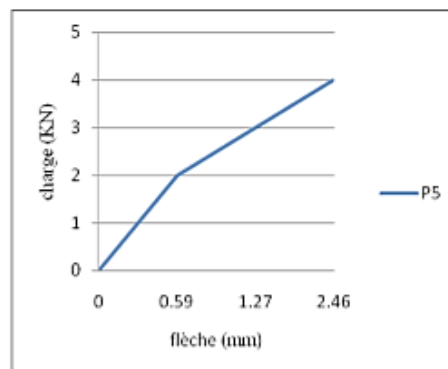


Figure II.15. Diagramme de charge-flèche de la poutre P5.

Les courbes charge/déformation des poutres P4, P6 et P7 montrent un comportement pseudo-ductile en trois étapes : une phase linéaire représentant la réponse élastique, une deuxième étape avec de petites fissures verticales et une phase finale non linéaire indiquant la rupture.

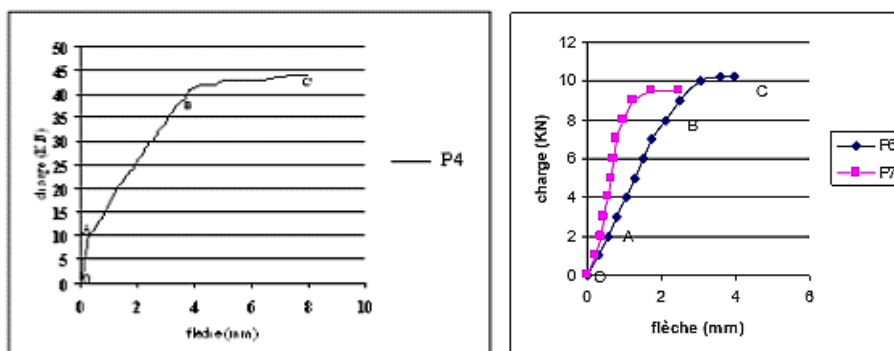


Figure II.16. Courbe charge-flèche P4 P6 P7.

La charge de rupture des poutres 3HA8 est de 43 kN, ce qui correspond étroitement aux calculs du BAEL (41,71 kN) et aux règles de similitude (90 kN). La poutre P11 présente deux branches charge-déformation, la seconde indiquant une fissuration et un retrait du composite. La poutre P11 est moins fragile que la poutre P5, avec une déflexion inférieure de 17 %, mais une résistance ultime exagérée. Cela pourrait être dû à des erreurs de chargement. La théorie de Bazant explique l'effet d'échelle, avec des structures géométriquement similaires de tailles différentes ayant le même niveau de contrainte pour un comportement ductile, mais une réduction significative de la résistance dans les cas fragiles.

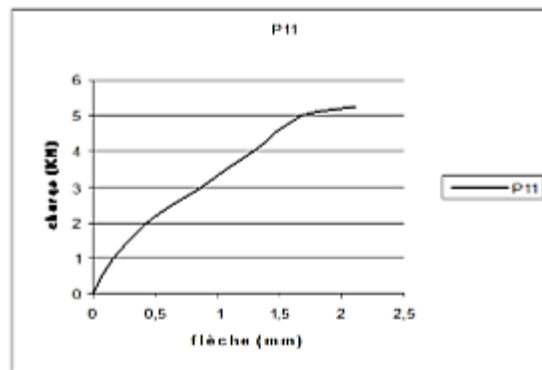


Figure II.17. Courbe charge / flèche de la poutre P11.

Les poutres P1 et P3 présentent des courbes de déflexion similaires en fonction de la charge, divisées en deux phases linéaires avec des pentes opposées et un "point d'inflexion". La première phase représente la phase élastique, tandis que la seconde se caractérise par une augmentation rapide de la déflexion et la formation de fissures. Les poutres renforcées P1 et P3 sont plus rigides que la P4 avec un gain de charge ultime de 49%. La charge de plastification du composite est définie par le point d'intersection des deux droites de la loi de comportement.

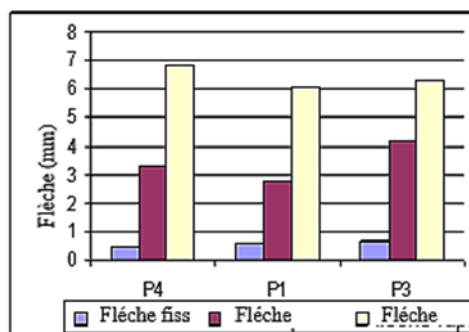


Figure II.18. Comparaison entre la fissuration, la plastification et la rupture des poutres P1, P3 et P4.

Les poutres P1 et P3 présentent de nombreuses petites fissures de cisaillement, tandis que la poutre P4 (contrôle) présente des fissures de flexion plus importantes et espacées. Les poutres P2, P8, P9 et P10 se sont principalement rompues à cause de fissures de cisaillement. La poutre P2 présentait des fissures diagonales, la rupture de la poutre P9 a commencé au-dessus de la bande TFC, et la poutre P10 présentait de grandes fissures mais une couverture de béton intacte.

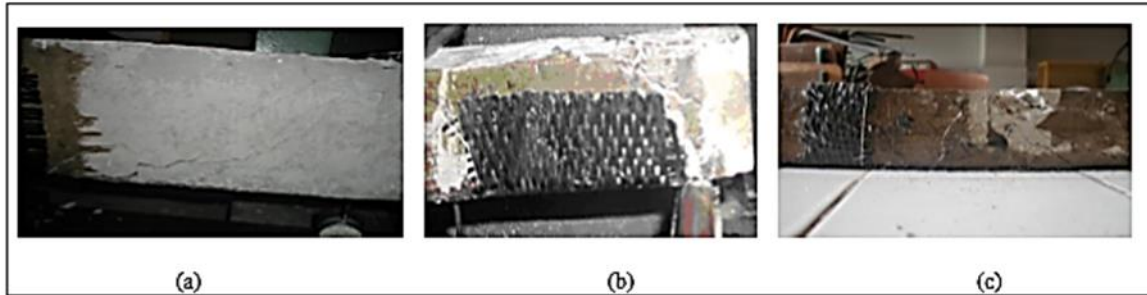


Figure II.19. Modes de rupture des poutres P2, P9 et P10.

Nous pouvons déduire que la résistance ultime des poutres renforcées au TFC a augmenté jusqu'à 51 %. Bien que la rigidité et la résistance s'améliorent, les gains sont limités. Les poutres initialement fissurées sont plus performantes que les poutres directement renforcées en raison d'une déviation réduite avant la plastification et d'une extension/ouverture limitée des fissures. Les résultats analytiques/expérimentaux montrent une meilleure résistance au cisaillement avec des bandes en forme de U collées à l'extérieur, mais un modèle prédictif est nécessaire.

➤ **PAGE Jonathan & BOUTOUIL M & KHADRAOUI F & GOMINA M** ont réalisé une étude des propriétés mécaniques du béton renforcé par des fibres de lin à l'aide de méthodes expérimentales et analytiques [67]. En se concentrant sur l'utilisation des fibres de lin dans les matériaux de construction, en particulier dans le renforcement du béton. Trois longueurs de fibres et trois taux d'incorporation ont été testés. Les fibres de lin absorbent rapidement et de manière significative l'eau, ce qui affecte la maniabilité du béton et diminue la résistance à la compression. Cependant, la résistance à la flexion a augmenté, en particulier pour les fibres de 12 et 24 mm, et a augmenté avec des taux d'incorporation plus élevés.

Dans ce texte, il examiné les caractéristiques mécaniques du béton renforcé par des fibres de lin, en analysant l'influence de la longueur et du pourcentage des fibres sur ses caractéristiques. On a évalué l'absorption des fibres de lin et on a réalisé des tests d'affaissement au cône d'Abrams afin d'évaluer leur ouvrabilité. On a mesuré la concentration d'air afin de déterminer si les fibres de lin l'accroissent. On a évalué les caractéristiques mécaniques en effectuant des essais de compression et de flexion à quatre points. Trois longueurs et teneurs en fibres de lin

ont été examinées lors de l'analyse. Cette étude a utilisé 10 formulations de béton : un contrôle sans fibres de lin et 9 versions renforcées par des fibres, avec 3 longueurs de fibres (12, 24, 36mm) et 3 ratios (0.1, 0.2, 0.3). Le pourcentage de fibres est un rapport entre le volume de fibres et le volume du lot, le volume de fibres étant dérivé du volume d'agrégats, en maintenant constants le rapport gravier-sable et le dosage du volume des constituants.

La résistance à la compression a été mesurée à l'aide d'un essai de compression sur des échantillons cylindriques de 11x22 cm après 7-28 jours de durcissement. Les échantillons enduits de mortier ont été testés à une vitesse de chargement de 6 kN/s. La résistance à la compression a diminué avec l'ajout de fibres de lin, à la fois à 7 et 28 jours de durcissement.

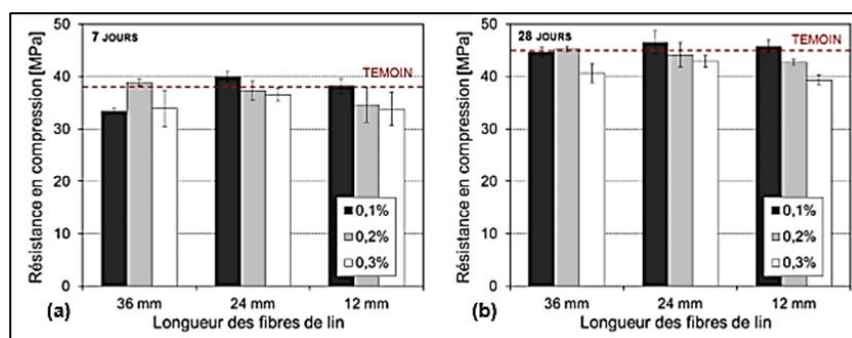


Figure II.20. Les bétons bio-fibrés ont une résistance en compression après une cure de 7 jours (a) et 28 jours (b).

La résistance à la compression du béton renforcé par des fibres diminue à mesure que le pourcentage de fibres de lin incorporées augmente, en raison de l'occlusion de l'air, la diminution affectant davantage les fibres courtes. L'essai de flexion à quatre points montre que la résistance à la flexion augmente avec des taux d'incorporation de fibres plus élevés, à l'exception des fibres de 36 mm qui peuvent s'enrouler ou se plier dans le béton, ce qui entraîne une résistance à la flexion plus faible. Le béton contenant 0,3 % de fibres de 12 mm a montré la meilleure résistance à la flexion, augmentant de plus de 20 % par rapport au béton de contrôle non renforcé par des fibres.

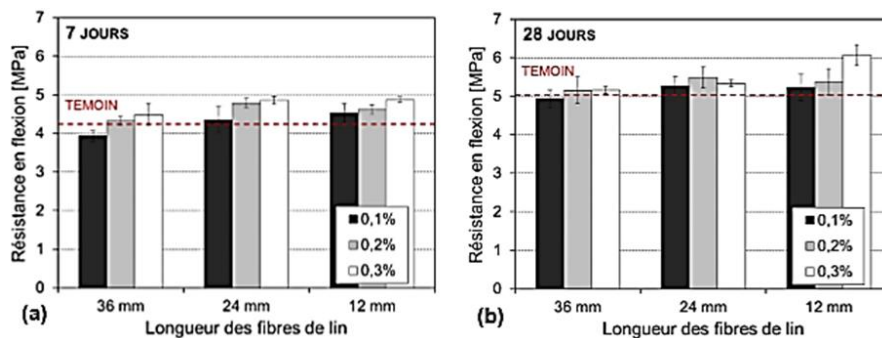


Figure II.21. Les bétons bio-fibrés ont une résistance en flexion après 7 jours (a) et 28 jours (b).

En conclusion, les résultats montrent que la résistance à la compression varie, probablement en raison de l'augmentation de la porosité. En ce qui concerne la résistance à la flexion, les bétons renforcés par des fibres de 12 et 24 mm s'améliorent, la résistance augmentant avec le pourcentage de fibres. La longueur de fibre de 12 mm offre le meilleur équilibre entre la résistance à la flexion et l'ouvrabilité, l'augmentant de plus de 20 %. Cette longueur réduit également la perte d'ouvrabilité.

➤ **Bouras, Kaci et Roth** ont étudié le comportement rhéologique des bétons de fibres métalliques à l'état frais [68]. Ils ont constaté que le béton renforcé de fibres métalliques présentait des performances mécaniques améliorées mais une ouvrabilité réduite en raison de l'ajout de fibres. Deux séries d'essais ont été menées, en faisant varier le pourcentage et la longueur des fibres. L'étude s'est concentrée sur l'effet de la concentration en fibres métalliques et de l'éclatement sur les propriétés rhéologiques. Une base théorique pour le comportement et la courbe d'écoulement est établie, puis comparée aux résultats expérimentaux utilisant des fibres d'acier, d'une épaisseur de 25 à 35 microns, dans un béton fabriqué selon la méthode de G. Dreux. Le volume d'essai est de 8 litres avec plus d'éléments fins.

Tableau II.2. Composition massique du béton.

Ciment (kg)	Gravier (0/3) (kg)	Gravier (3/8) (kg)	Gravier (8/15) (kg)	Eau (litre)
3,20	4,80	1,70	7,74	1,57

Les essais confirment l'accumulation des fibres et du gravillon dans la partie supérieure de la cuve de mesure; Lors de chaque essai, il a été nécessaire de vibrer la cuve de mesure contenant le béton frais afin d'éviter ce problème. La concentration des fibres a un impact sur : Les résultats bruts des essais effectués sont présentés.

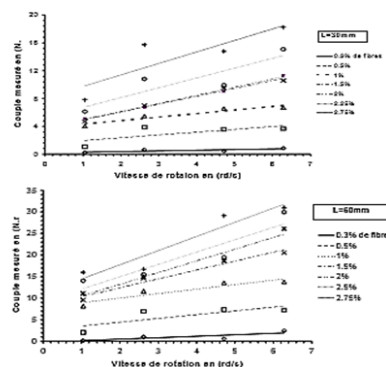


Figure II.22. Vitesse de couple dans les bétons à fibres métalliques.

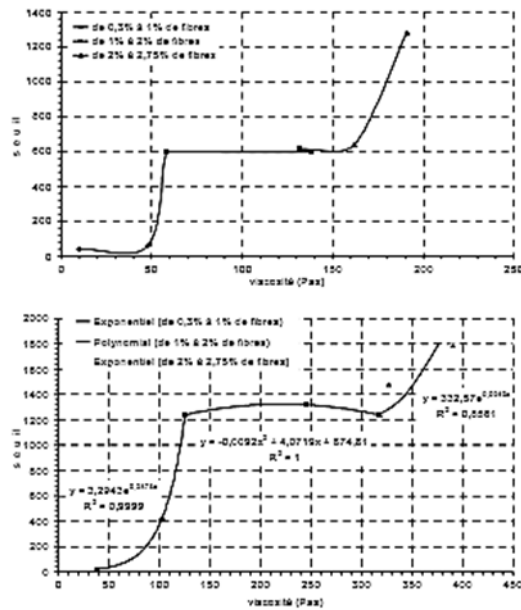


Figure II.23. La viscosité affecte les qualités rhéologiques du béton avec une teneur en fibres variant de 0,3 % à 2,75 %.

- Evolution du seuil avec la concentration en fibres :

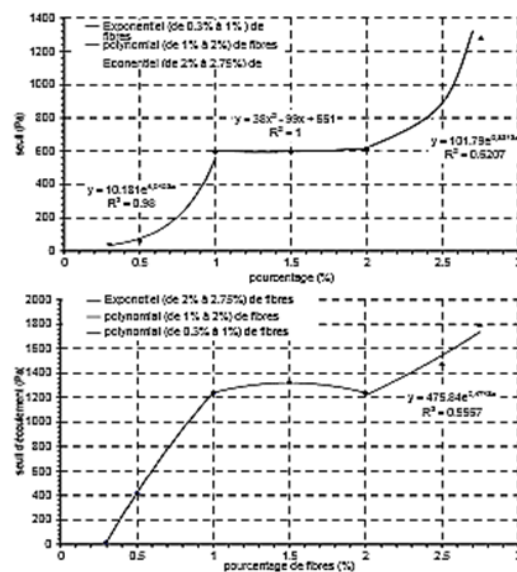


Figure II.24. Le seuil d'écoulement et le pourcentage de fibres (L=50mm) sont en relation.

L'incorporation de fibres métalliques dans le béton réduit l'ouvrabilité et provoque une déstabilisation. Un seuil se stabilise à une teneur en fibres de 1 à 2 % en raison de l'orientation des fibres. Au-delà d'une concentration de 2 %, des amas et des enchevêtrements se forment, ce qui augmente le seuil d'écoulement. À 2,75 % ou plus, le béton frais ne s'écoule pas, ce qui montre l'impact de la concentration en fibres sur le comportement rhéologique.

- Variation de la viscosité en fonction du nombre de fibres :

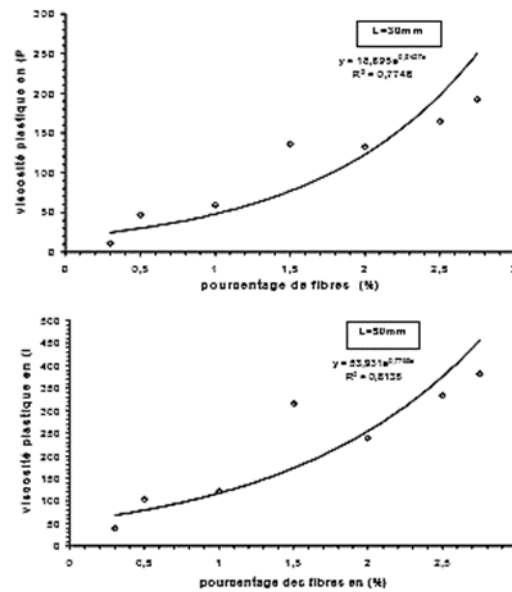


Figure II.25. Modifications de la viscosité plastique en fonction du taux (l=30mm).

La viscosité plastique du béton de fibres métalliques augmente avec la teneur et la longueur des fibres, jusqu'à un certain point. Au-delà de 2,5 % de fibres, le béton frais ne s'écoule pas. Une plus grande longueur de fibre augmente le seuil d'écoulement et la viscosité plastique, réduisant la maniabilité.

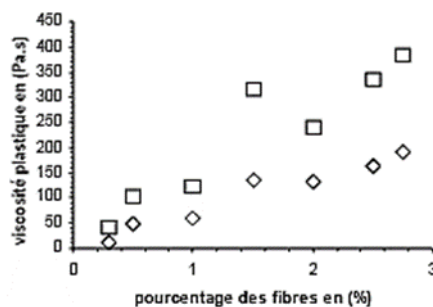


Figure II.26. La viscosité plastique avec pourcentage des fibres.

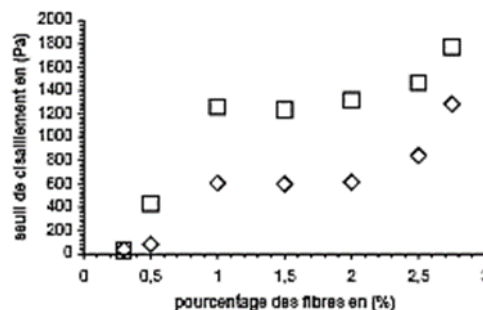


Figure II.27. Expansion du seuil d'écoulement avec le pourcentage de fibres pour 30 mm et 50 mm.

Ainsi, le seuil d'écoulement augmente avec le pourcentage de fibres, culminant à 2,75 %, et la viscosité plastique augmente avec la teneur en fibres. Une teneur optimale en fibres de 1,5 à 2,5

% est recommandée, les propriétés rhéologiques étant prises en compte en fonction de la longueur et de la concentration des fibres.

➤ Une étude réalisée par **A ELLOUZE et al.** a examiné le béton renforcé par des fibres métalliques en utilisant des matériaux locaux [69]. La recherche a formulé un béton de fibres métalliques, étudié les effets des fibres sur le comportement des poutres en béton armé et testé l'impact des fibres sur les propriétés mécaniques, y compris la compression, la tension, la ductilité et la rigidité. Le dosage optimal des fibres a été sélectionné en fonction de la facilité d'utilisation du béton. Les résultats ont permis d'améliorer les propriétés mécaniques du béton et sa rigidité en flexion.

Tableau II.3. Composition du béton témoin (pour un m³).

Gravier / Sable --- (G / S)	1,2
eau / ciment --- (E / C)	0,4
Ciment CPI 32.5 (Kg)	400
Sable lavé (Kg)	837
Gravier (Kg)	1005
super-plastifiant, Viscocrète 5400F (Kg)	6

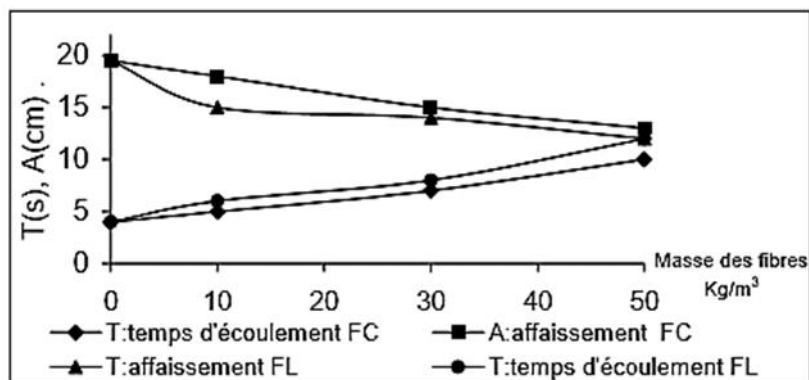


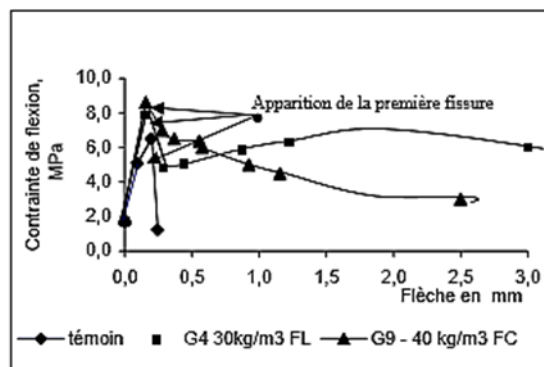
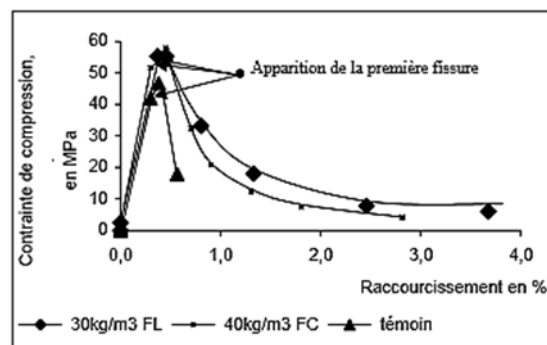
Figure II.28. Variation de l'affaissement et du temps d'écoulement avec la masse des fibres.

Les valeurs moyennes pour les trois essais de compression et de traction (par fendage) sur des éprouvettes cylindriques de 16x32 cm² pour le béton témoin et les bétons de fibres métalliques (BFM) sont regroupées dans ce tableau. Les fibres renforcent de la résistance maximale à la traction pendant 28 jours est plus significative que celle à la compression. Pour le dosage de 50 Kg/m³, la résistance à la compression et à la traction diminue par rapport au dosage de 30 Kg/m³. Le ratio Gravier/Sable (G/S) baisse avec la masse fibres par m³).

Tableau II.4. Les résultats des tests de compression et de traction par fendage (MPa).

Essais	âge	Béton témoin	Dosage de FL : RC 80/50-BN			Dosage de FC : RC 65/35-BN		
			10 kg/m ³	30 kg/m ³	50 kg/m ³	10 kg/m ³	30 kg/m ³	50 kg/m ³
compression	3 jours	15,7	30,7	37,9	26,4	29,0	31,5	32,8
	7 jours	33,9	37,5	41,9	40,6	35,3	41,3	40,3
	28 jours	49,8	52,8	55,3	46,9	50,1	53,9	49,6
traction par fendage	7 jours	3,0	3,5	5,2	5,0	3,4	4,7	5,3
	28 jours	3,6	4	6	4,9	4	5,2	5,1

Les fibres métalliques empêchent la formation de fissures, augmentent la force maximale et améliorent la ductilité/déformation des échantillons de 7x7x28 cm. Les courbes montrent une diminution de la contrainte de flexion et de la contrainte de compression avec l'ajout de fibres.

**Figure II.29.** Changement de la contrainte de flexion fonction de la flèche.**Figure II.30.** La contrainte de compression évolue en fonction du raccourcissement.

Les fibres métalliques cousent les fissures, améliorent la ductilité et retardent la déformation. Les BFM sont ductiles et la rupture du béton témoin est fragile.



Figure II.31. Rupture des poutres en béton et en béton de fibres.

Les poutres renforcées de fibres résistent mieux à la rupture par cisaillement que les poutres sans fibres, mais moins que les poutres de contrôle. Les fibres métalliques pourraient remplacer les cadres de cisaillement. Les poutres sans fibres se brisent sous l'effet de la force de cisaillement.

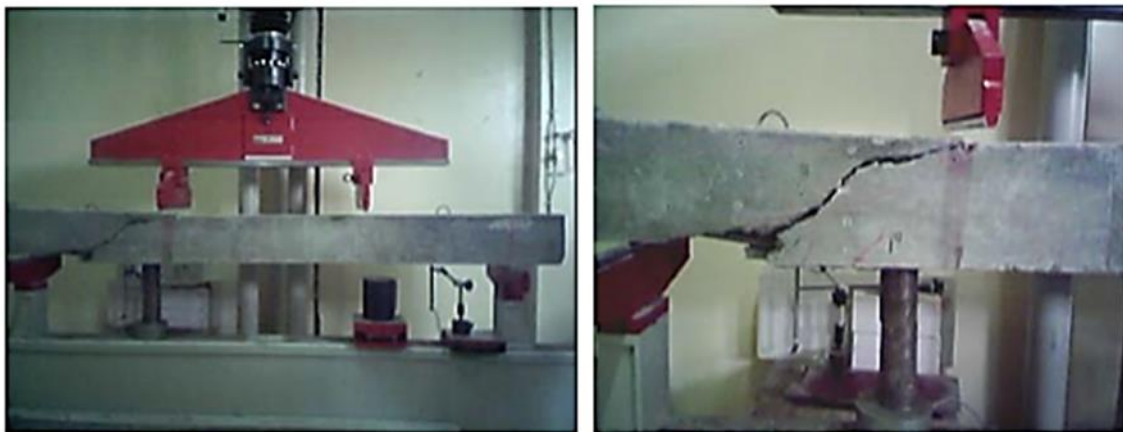


Figure II.32. La rupture des poutres sans la force de cisaillement des fibres métalliques.

La plastification de l'armature dans les poutres à fibres courtes provoque une rupture par cisaillement, ce qui entraîne des fissures perpendiculaires du côté du cadre. Cela affecte la résistance de la poutre.



Figure II.33. Rupture des poutres en béton de fibres métalliques courtes.

Les renforts plastifiés, les fissures perpendiculaires du côté du cadre et les microfissures à 45° du côté opposé au cadre déterminent la résistance au cisaillement dans les poutres renforcées, provoquant une rupture par cisaillement induite par la contrainte.



Figure II.34. Rupture des poutres en béton de fibres métalliques courtes et longues.

En conclusion, les propriétés mécaniques du béton optimisé s'améliorent avec l'ajout de fibres (30 kg/m³ longues, 40 kg/m³ courtes) jusqu'à la teneur optimale, les capacités de traction/compression sont affectées. La longueur des fibres a un impact sur la résistance des poutres en béton et sur le retardement des fissures (fibres courtes) et sur la ductilité (fibres longues). Les réparations futures pourraient utiliser des fibres métalliques courtes pour réparer les fissures dues à l'effort de cisaillement. La combinaison de fibres courtes et longues renforce la résistance et améliore la ductilité.

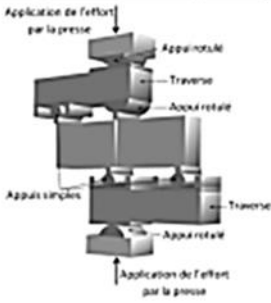
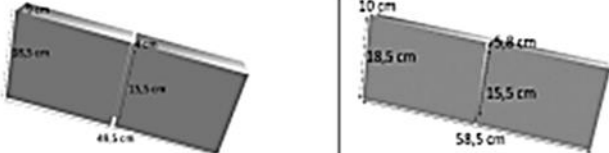

➤ **Amaury Herrera**, Fonctionnement des jonctions âmes-membrures en Béton Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) [70]. Cette étude porte sur l'utilisation des jonctions UHPC (Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete) dans les structures complexes, dans le but de comprendre les phénomènes physiques impliqués et d'optimiser les techniques de calcul. L'étude est divisée en quatre étapes : une étude bibliographique, le développement d'un modèle analytique étendu, une étude expérimentale du comportement du BFUP et la création de nouveaux outils de dimensionnement. Les résultats expérimentaux ont été comparés à diverses prédictions analytiques. Trois BFUP (Bétons Fibrés Ultra Performants) - "A", "B", et "C" - ont des volumes de fibres et des tailles d'agréats différents. "A" et "B" partagent une matrice cimentaire, tandis que "C" utilise des agrégats plus gros, augmentant la dureté au-delà des bétons ordinaires, de haute performance et de très haute performance, assurant une interface robuste entre le matériau granulaire et la matrice cimentaire.

Tableau II.5. Caractéristiques de la composition des BFUP étudiés.

	BFUP A	BFUP B	BFUP C
<u>Longueur des fibres (mm)</u>	14		20
<u>Diamètre des fibres (mm)</u>	0,2		0,3
<u>Volume de fibres (%)</u>	1	3	2,5
<u>Diamètre du plus gros granulat (mm)</u>	0,8		5

Une vision synthétique de l'ensemble des essais réalisés et des paramètres définissant chacun d'entre eux est présentée dans le Tableau.

Tableau II.6. Synthèse des essais de cisaillement pur réalisés.

	BFUP A	BFUP B	BFUP C
Principe de sollicitation	 <p>La presse hydraulique est pilotée en déplacement vérin à une vitesse de 0,06 mm/min</p>		
Géométrie des corps d'épreuve testés			
Instrumentation mise en place	 <p>Sur chaque face :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2 mesures d'ouverture de fissure - 1 mesure de glissement 		
Diamètre des fibres (mm)	0,2		0,3
Longueur des fibres (mm)	14		20
Volume de fibre V_f (%)	1	3	2,5
Diamètre du plus gros granulat (mm)	0,8		5
Nombre d'essais	2	2	2
Date des essais	03/06/2016	08/06/2016	22/06/2016
Fabrication	17/09/2014 à l'IFSTTAR	21/11/2014 à l'IFSTTAR	24/09/2014 dans les locaux du partenaire industriel
f_t (MPa)*	228	231,6	199,9
f_{t4} (MPa)* (flexion 4 points)*	15,2	15,0	16,6
f_{t4} (MPa)* (flexion 4 points)	8,6	13,8	10,8
f_{t3} (MPa)* (flexion 3 points)	8,0	16,8	10,5
f_{tsc} (MPa)* (flexion sur prismes cisaillement)	8,3	-	12,6

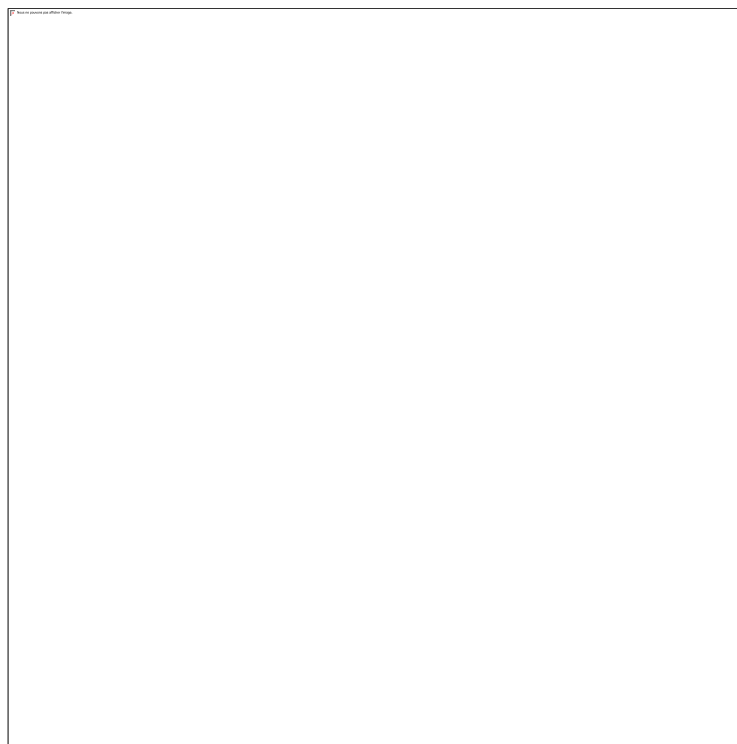


Figure II.35. Lois de comportement en traction du BFUP A.

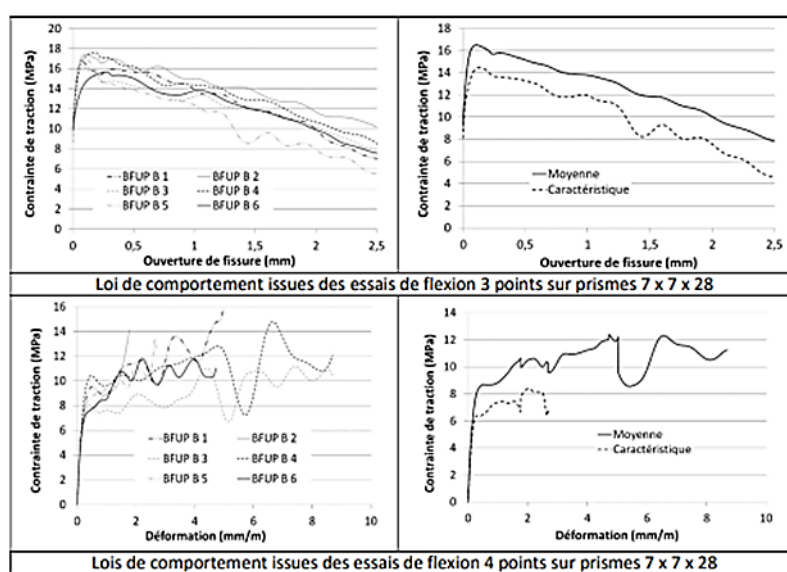


Figure II.36. Lois de comportement en traction du BFUP B.

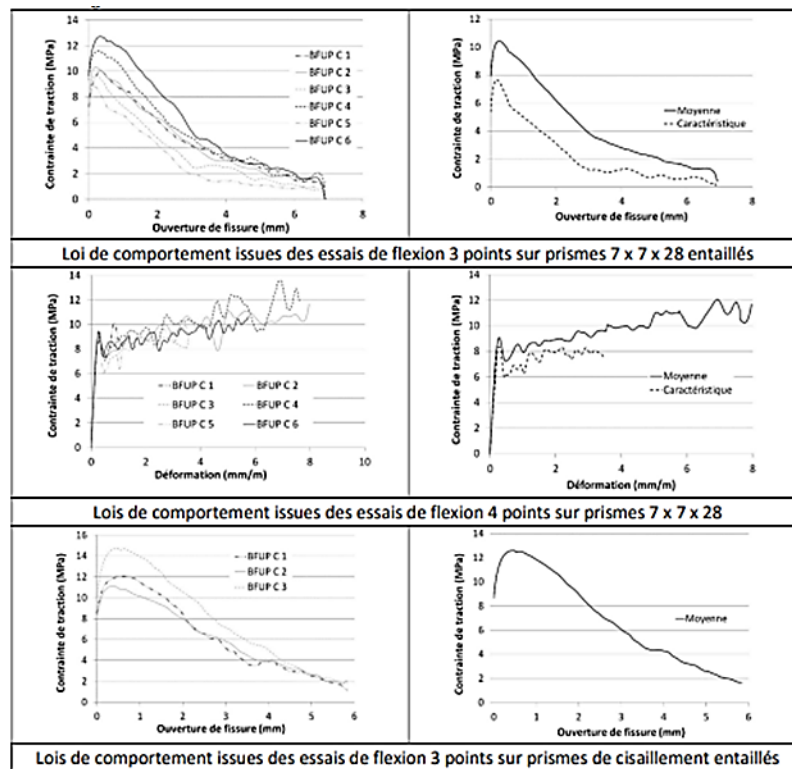


Figure II.37. Lois de comportement en traction du BFUP C.

En comparant les résultats des différents matériaux :

- Le BFUP A présente le taux le plus bas de fibres et le plus bas de granulats. Surprise, la résistance la plus faible et la ductilité la plus faible.
- Le BFUP B est composé de la matrice cimentaire identique à celle du BFUP A. Les fibres présentent la même géométrie et caractéristiques que celles du BFUP A. En augmentant le volume de fibre (1% pour le BFUP A contre 3% pour le BFUP B), on peut améliorer la résistance (coefficient de 1,9 entre les résistances au Cisaillement) et la ductilité des corps d'épreuve.
- Le BFUP C présente une composition complètement différente des deux autres compositions, qui sont des granulats plus volumineux et plus longs de fibres. Cette formulation protège le matériau. Il est plus important d'accepter une ouverture de fissure et un glissement que les BFUP A et B.

➤ **Maxime Gascon** a réalisé une analyse expérimentale et analytique de connecteurs de cisaillement en béton fibré à haute performance pour la construction de poutres mixtes de ponts [71].-Améliore la durabilité, réduit l'entretien et diminue les perturbations du trafic, offrant ainsi des avantages économiques tout au long du cycle de vie de la structure. La dalle est en béton BRHP70-1%, de dimensions 1200x1000x200mm, avec un joint UHPC (Ductal® de Lafarge) de 200mm de large et de hauteur variable. L'armature de la dalle comprend des barres 20M tous les 250mm, et des goujons 7/8" avec un $h/d \geq 4.0$. Le profil W250x131 a été choisi pour sa

Tableau II.10. Propriétés en compression du BFUP.

Phase	Date de l'essai	Échéances (jours)	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	ν
I	2015-03-10	6	99,6	-	-
	2015-03-18	14	134	57300	0,18
	2015-03-31	27	149	59100	0,18
	2015-04-20	47	150	58900	0,19
	2015-05-26	83	152	59000	0,26
	2015-06-30	118	140	63300	0,22
II	2015-07-20	28	156	53800	0,23
	2015-08-10	49	170	58000	0,18

Cette section présente les courbes comportementales de traction du BFUP La figure ci-dessous présente la relation entre la contrainte-déformation et l'ouverture de fissures des essais choisis.

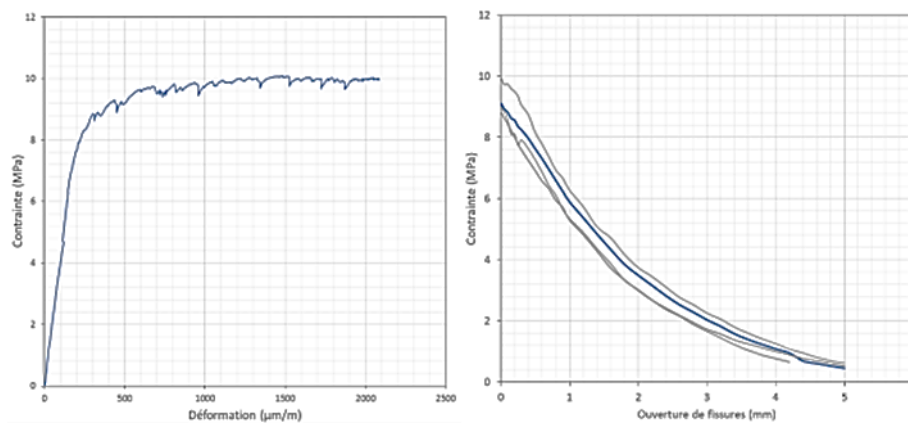


Figure II.38. Résultat d'essais d'os en BFUP.

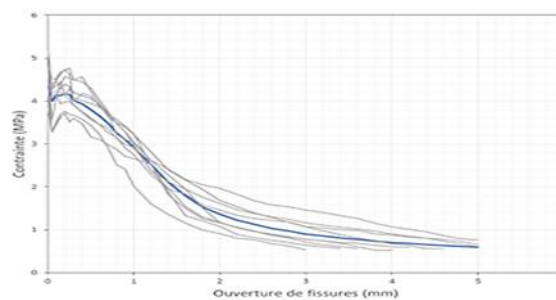


Figure II.39. Résultat d'essais d'os en BFHP.

- La relation charge-flèche obtenue lors des essais sur prismes entaillés en BFHP est présentée dans la figure ci-dessous.



Figure II.40. Prisme entaillé – Moyenne BFHP.

Selon l'expérience, il a été démontré que l'utilisation d'une armature de cisaillement dans des joints de BFUP à une densité de 2% par volume était plus efficace qu'une dalle traditionnelle en BO. Les goujons à 20 mm peuvent être placés sous le lit d'armatures inférieurs dans un BFUP sans avoir recours aux armatures supplémentaires en U. L'élancement des goujons n'a pas d'impact sur le comportement des spécimens en BFUP. Cependant, la présence d'un gousset a un impact considérable sur le comportement des structures avec une dalle en BO.

Conclusion du chapitre

Le génie civil utilise la théorie de flexion pour étudier et anticiper le comportement des poutres et des structures qui sont soumises aux charges appliquées. Elle est basée sur l'idée que les matériaux se déforment de façon élastique, c'est-à-dire qu'ils retrouvent leur forme initiale une fois que la charge est retirée. Selon la théorie de flexion, les poutres sont constituées de fibres parallèles qui, en fonction de leur distance à l'axe neutre de la poutre, subissent des déformations. Elle offre la possibilité de mesurer les contraintes et les déformations à l'intérieur de la poutre en se basant sur la répartition des charges pesantes. La théorie de flexion examine la corrélation entre la contrainte et la déformation dans une poutre qui est soumise à une élévation. Selon la loi de Hooke, la contrainte est inversement proportionnelle à la déformation, avec un coefficient de proportionnalité appelé module de flexion. L'utilisation de la théorie de flexion permet également d'évaluer la courbure d'une poutre en prenant en compte les charges appliquées et les caractéristiques du matériau. Les contraintes maximales à l'intérieur de la poutre peuvent être calculées grâce à elle, ce qui est crucial pour définir des structures sûres et solides.

Chapitre III

CHAPITRE III : PROCEDURE EXPERIMENTALE

III-1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de décrire les caractéristiques des matériaux utilisés, les compositions des bétons et le dispositif expérimental mis en œuvre. Les compositions des bétons et le dispositif expérimental ont été élaborés au laboratoire central des travaux publics de Bouira.

L'objectif de cette recherche est d'améliorer la résistance à la flexion des poutres en béton en utilisant des fibres métalliques comme renforcement. Pour évaluer cette amélioration, des tests de flexion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques. Ces éprouvettes, de section 150 x 100 mm et d'une longueur de 600 mm, ont été fabriquées afin de déterminer la résistance des bétons renforcés. Les essais permettent de comparer la performance des bétons avec fibres métalliques à celle des bétons traditionnels, en analysant les résultats obtenus pour en tirer des conclusions sur l'efficacité de ce type de renforcement. Pour les besoins des essais mécaniques de flexion, nous avons préparé plusieurs mélanges en utilisant le même pourcentage et la même quantité de fibres, tout en modifiant leur emplacement pour chaque variante. Le protocole expérimental inclut les spécifications des matériaux employés, les notations adoptées, ainsi que les méthodes de fabrication de toutes les éprouvettes. Les résultats obtenus sont ensuite présentés et analysés.

III-2 Matériaux utilisés

III-2-1 Ciment

Dans ce travail on a utilisé CEM I 42.5 N SR3 LH de la cimenterie de BISKRA a résistance au sulfate à faible chaleur d'hydratation, conforme à la norme algérienne (NA442-2013).



Figure III.1. Ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA)

III-2-1-1 Caractéristiques techniques

-Analyses chimiques (%) :

Tableau III.1. Analyses chimiques de ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA).

Perte de feu	SO ₃	MgO	Cl ⁻	Résidu insoluble	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF+2C ₃ A
< 3	2,2--2,6	< 3,5	< 0,04	≤0,75	60	< 3	< 20

- Propriétés physiques :

Tableau III.2. Propriétés physiques de ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH de BISKRA)

Consistance normal (%)	26,5
Expansion à chaud (mm)	< 1
Début de prise (min)	180
Fin de prise (min)	320

III-2-2 Sable

Le sable employé dans cette expérimentation est un mélange de deux types de sable :

- Sable fin (dune)0/3 d'oued Souf ;
- sable Meziane 0/5 BORJ BOARIRIJ.

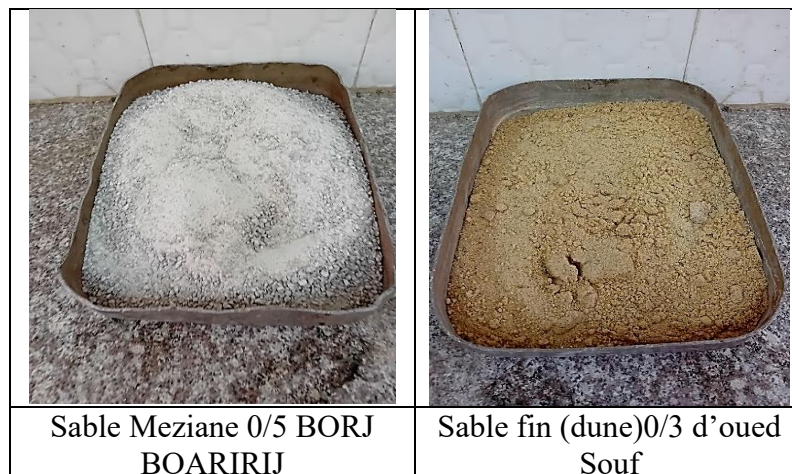


Figure III.2. Sables utilisés

III-2-3 Granulats

Deux classes granulaires de graviers sont utilisées dans ce travail : une fraction de 3/8 concassée provenant de El-Hachimia dans la wilaya de Bouira, et une fraction de 8/15 concassée provenant de Meziane dans la wilaya de Borj Bou Arréridj.

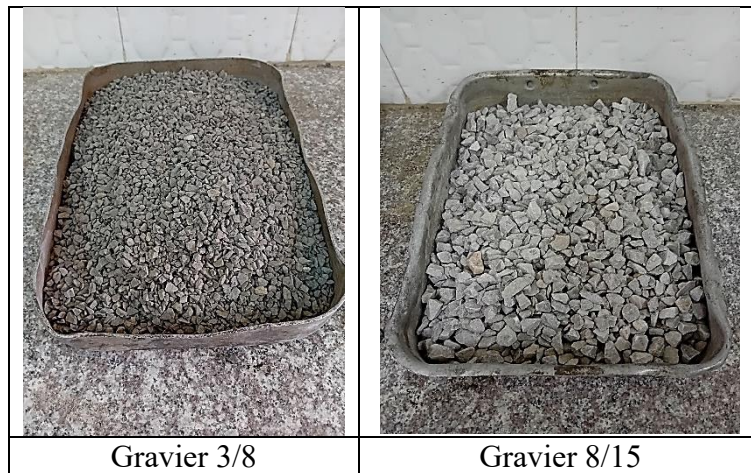


Figure III.3. Graviers

III-2-4 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage employée provient du robinet (eau potable).



Figure III.4. L'eau de gâchage

III-2-5 Fibres

Les fibres employées sont des fibres métalliques de type 3D 80/50 BG. Elles sont produites à partir de fil d'acier non allié, conçu pour laminage à froid, conformément aux normes NF EN 10016-1 et NF EN 10016-2 d'août 1995, et bénéficient du marquage CE.[72]



Figure III.5 Fibres utilisées

Les principale caractéristiques dimensionnelles et physiques sont :

Tableau III.3. Caractéristiques de Fibre

Caractéristique	Valeur
Longueur	50mm± 3mm
Diamètre	0,62 mm±0,02 mm
L des extrémités des crochets	1,5mm ≤ L ≤ 4mm
Angle du crochet	$\alpha \geq 20$ degrés
Résistance à la traction du fil	$R_m \geq 1050 \text{ N/mm}^2$

III-3 L'analyse granulométrique par tamisage « NF EN 933-1(Mai 2012) »

L'analyse granulométrique permet de mesurer la taille et les proportions pondérales des diverses catégories de grains composant l'échantillon. Cette méthode est applicable à tous les granulats dont la dimension nominale est inférieure ou égale à 90 mm, à l'exception des fillers. Il est important de faire la distinction entre la granulométrie, qui se concentre sur la mesure de la dimension des grains, et la granularité, qui concerne la répartition des dimensions des grains dans un granulat. L'essai consiste à classer les grains de l'échantillon à l'aide d'un ensemble de tamis superposés, avec des ouvertures de dimensions diminuant progressivement du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en haut de la colonne de tamis, puis les grains sont triés en vibrant cette colonne. Avant de procéder au tamisage, l'échantillon est lavé au moyen d'un tamis de 0,063 mm pour éliminer les particules fines et prévenir toute agglomération des grains, ce qui pourrait influencer les résultats de l'analyse. Ensuite, une analyse granulométrique est effectuée.

III-3-1 Principe de l'essai

L'essai a pour but de trier les divers grains composant l'échantillon au moyen d'une série des tamis de diamètres croissant.

III-3-2 Equipement nécessaire

Etuve normalisé

Balance normalisée

Une série de tamis d'ouverture de mailles normalisés.

Des récipients en plastique.

III-3-3 Mode opératoire

Le béton est préparé à partir de granulats de forme concassée, dont le diamètre varie entre 0/3,0/5,3/8 et 8/15. Tout d'abord, il est essentiel de vérifier la propreté, l'état et l'imbrication des tamis, ainsi que la stabilité de la balance. Ensuite, il est nécessaire d'ajouter des tamis intermédiaires pour éviter une surcharge sur les tamis d'ouverture nominale et faciliter l'opération de tamisage. Les échantillons sont ensuite séparés selon les normes EN 932-2 pour obtenir une ou deux prises d'essai. Après avoir séché la prise d'essai, sur la porte à une température de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à obtenir une masse constante. Sur la laisse refroidir, sur la pèse et sur enregistrer la masse M1. Après avoir placé l'échantillon dans un récipient et ajouté la quantité d'eau nécessaire pour la submerger pendant 24 heures, agiter cette prise afin de réaliser une séparation complète et la mise en suspens des fines. Ensuite, humidifiez les deux côtés d'un tamis de $63\mu\text{m}$ en adaptant un tamis de protection ($\varnothing=1$ ou 2mm) au-dessus. Faire glisser le contenu du récipient dans le tamis supérieur et continuer le lavage jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis de $63\mu\text{m}$ soit transparente.

Sécher le refus en tamis de $63\mu\text{m}$ à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse soit constante et laisser refroidir et peser et inscrire M2.

Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis et agiter manuellement ou mécaniquement pendant 10 min.

Vérifier par des tamisage supplémentaires (agitation manuelle) que la variation de masse de refus ne dépasse pas 1%, après transférer tout le matériau passant à travers chaque tamis vers le tamis suivant de la colonne avant de continuer l'opération avec ce tamis.

Poursuivre la même opération pour tous les tamis qui sont dans la colonne, et noter ces masses, R1, R3,Rn.

Calculer le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 63 mm avec à l'équation :

$$\frac{(M1 - M2) + p}{M1} \times 100$$



Figure III.6. Série des tamis

Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (III.4, III.5, III.6, III7).

Tableau III.4. Analyse granulométrique pour le sable 0/3

Ouverture tamis(mm)	Masse Refus Ri(g)	Masse refus cumulés Rn(g)	%refus cumulés (Rn /M1×100)	% cumulés Tamisât	N° tamis
8	0,0	0,0	0,0	100	7450
6,3	6,2	6,2	1,32	99	7451
4	122,9	129,1	28,84	71	7453
2	123,7	252,8	56,47	43	8100
1	58,8	311,6	69,61	30	5243
0,500	34,1	345,6	77,23	23	2679
0,250	23,1	368,8	22,39	18	1732
0,125	15,0	383,8	25,74	14	7457
0,063	8,7	392,5	87,68		7250
Refus Cumulé	$\sum Ri= 392,5$				
Fond Tamis	P=0,0				

Masse humide M'1= 876,1g

Masse sèche M1=447,6g

Teneur en eau W=1%

Masse sèche après lavage M2= 392,5g

Masse sèche des fines retirées par lavage M1-M2=55,1g

Le pourcentage des fines f =12,3

Tableau III.5. Analyse granulométrique pour le sable 0/5

Ouverture tamis(mm)	Masse refus Ri(g)	Masse refus cumulés Rn(g)	%refus cumulés (Rn /M1×100)	% cumulés tamisât	N° tamis
8	0,0	0,0	0,0	100	7450
6,3	0,9	0,9	0,30	100	7451
4	2,2	3,1	1,06	99	7453
2	9,8	12,9	4,41	96	8100
1	32,0	44,9	15,36	85	5243
0,500	91,0	135,9	46,50	54	2679
0,250	98,3	234,2	80,15	20	1732
0,125	45,1	279,3	95,58	4	7457
0,063	9,5	288,8	98,83		7250
Refus Cumulé	$\sum Ri = 288,8$				
Fond Tamis	P = 0,3				

Masse sèche M1=292,2g

Masse sèche après lavage M2= 289,1g

Masse sèche des fines retirées par lavage M1-M2=3,1g.

Le pourcentage des fines f = 1,2

Tableau III.6. Analyse granulométrique pour le gravier 3/8

Ouverture tamis(mm)	Masse Refus Ri(g)	Masse refus cumulés Rn(g)	%refus cumulés (Rn /M1×100)	% cumulés tamisât	N° tamis
12,5	0,0	0,0	0,00	100	284
10	0,0	0,0	0,00	100	7449
8	2,1	2,1	0,23	100	7450
6,3	53,6	55,7	6,29	94	7451
4	782,1	837,8	94,66	5	7453
2	23,5	861,3	97,35	3	7456
1	4,7	866,0	97,91	2	5243
0,500	1,0	867,0	97,99	2	2679
0,250	0,6	867,6	98,06	2	1732
0,063	2,6	870,2	98,36		7250
Refus Cumulé	$\sum Ri = 870,2$				
Fond Tamis	P = 0,5				

Masse sèche M1=884,7g

Masse sèche après lavage M2=870,7 g

Masse sèche des fines retirées par lavage M1-M2=14,0g.

Le pourcentage des fines f = 1,6

Tableau III.7. Analyse granulométrique pour le gravier 8/15

Ouverture tamis(mm)	Masse	de refus partiel	Masse refus $R_i=R_{p1}+R_{p2}$	Masse refus cumulés $R_n(g)$	%refus cumulés (R_n / $M_1 \times 100$)	% cumulés tamisât	N° tamis
	$R_{p1}(g)$	$R_{p2}(g)$					
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	100	7446
16	150,9	107,1	258,0	258,0	9,6	90	7447
14	501,2	347,0	848,2	1106,2	41,52	58	7448
12,5	91,7	72,7	164,4	1270,6	47,69	52	284
10	383,6	443,1	826,7	2097,3	78,72	21	7449
8	269,6	180,4	450,0	2547,3	95,61	4	7450
6,3	69,6	40,5	110,1	2657,4	99,74	0,2	7451
4	1,0	0,0	1,0	2658,4	99,78	0,2	7453
2	0,8	0,7	1,2	2659,6	99,82	0,2	7100
0,063	0,1	2,9	3,0	2662,6	99,93		7250
Refus Cumulé	$\sum R_i=266$	2,6					
Fond Tamis	$P=0,2$						

Masse sèche $M_1=2664,2g$

Masse sèche après lavage $M_2= 2662,8g$

Masse sèche des fines retirées par lavage $M_1-M_2=1,7g$.

Le pourcentage des fines $f=0,1$

III-4 Coefficient D'aplatissement « NF EN 933-3(Mars 2012) »

III-4-1 Principe de l'essai

Détermination de la forme des granulats.

III-4-2 Equipements nécessaires

Etuve normalisé

Balance normalisée

Les conteneurs

Les grilles à fentes

III-4-3 Mode opératoire

La propreté et l'état des équipements tels que la balance, l'étuve et le ou les conteneurs sont vérifiés.

La prise d'essai est séchée à $(110 \pm 5) ^\circ C$ pour obtenir une masse constante, puis laissée refroidir, pesée et enregistrée comme étant M_0 . La prise d'essai m_0 est tamisée sur les tamis de 4mm et 100mm, et tous les grains passant à travers le tamis de 4 mm et retenus sur celui de 100 mm sont

éliminés, après quoi les masses éliminées sont pesées et enregistrées. Ensuite, la prise d'essai est tamisée selon la plage appropriée de chaque granulat élémentaire di/Di. Chaque granulat élémentaire di/Di est rejeté séparément, puis pesé et enregistré comme Ri. Chaque granulat élémentaire di/Di obtenu est ensuite tamisé sur des tamis à barres (la grille à fentes) selon le procédé précédent, ce tamisage devant être effectué manuellement pour garantir une séparation complète. Pour chaque granulat élémentaire, le matériau passant à travers le tamis à barre correspondant est pesé et enregistré comme mi.

Le coefficient d'aplatissement globale « Fl »

$$Fl = (M2/M1) \times 100$$



Figure III.7. Grille à fentes

Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux (III 8, III 9).

Tableau III.8. Coefficient d'aplatissement de gravier 3/8

Tamissage sur	Tamis	Tamissage sur gri	les à fente	Aplatissement partiel
Classe granulaire(mm)	Masse granulat élémentaire Ri(g)	Largeur grille à fente (mm)	Passants sur grille à fente mi(g)	$Fl_i = (mi/Ri) \times 100$
10/12,5	0,0	6,3	0,0	0
8/10	0,0	5	0,0	0
6,3/8	119,8	4	40,5	34
5/6,3	550,3	3,15	127,8	23
4/5	145,3	2,5	15,3	10

$$M1 = \sum Ri : 815,4 \text{ g}$$

$$M2 = \sum mi = 183,6 \text{ g}$$

\sum masses fractions non soumises à l'essai : 0,0 g

Masse de la prise d'essai initiale M0 : 840,2 g

Passant sur le tamis 4 mm=22,2 g

$$Fl = 22 \%$$

Tableau III.9. Coefficient d'aplatissement de gravier 8/15

Tamisage sur	Tamis	Tamisage sur grille	lles à fente	Aplatissement partiel
Classe granulaire(mm)	Masse granulat élémentaire Ri(g)	Largeur grille à fente (mm)	Passants sur grille à fente mi(g)	Fli=(mi/Ri) ×100
20/25	0,0	12,5	0,0	0
16/20	404,0	10	59,6	15
12,5/16	1046,1	8	136,6	13
10/12,5	686,6	6,3	112,0	16
8/10	385,4	5	77,4	20
6,3/8	99,9	4	15,8	15

$$M1 = \sum Ri = 2622,0 \text{ g}$$

$$M2 = \sum mi = 4011,1 \text{ g}$$

\sum masses fractions non soumise à l'essai = 3,8 g

Masse de la prise d'essai initiale $M0 = 2630,31 \text{ g}$

Passant sur le tamis 4 mm = 2,7 g

F1 = 15 %

III-5 Équivalent de sable « NF EN 933-8 (juillet 2015) »

L'équivalent de sable est une mesure, employée en géotechnique, qui permet de déterminer la qualité d'un sable ou d'une grave. Il représente la quantité d'éléments fins, principalement d'origine argileuse, végétale ou organique, présents à la surface des grains.

III -5-1 Principe de l'essai

L'essai d'équivalent de sable est fréquemment utilisé pour évaluer la qualité des sables qui entrent dans la composition des bétons, mais il est moins important pour les sols. L'objectif de cette expérience est de distinguer les particules fines présentes dans le sol ; en utilisant une méthode standardisée, il est possible de calculer un coefficient d'équivalent de sable qui influence la qualité de celui-ci.

III-5-2 Matériels utilisés

- 02 éprouvettes, en matière plastique, avec 2 traits repères ; bouchons.
- Entonnoir pour introduire le sable.
- Bonbonne de 5 l.
- Bouchon pour cette bonbonne, avec siphon et tube souple de 1.5 m environ.
- Tube laveur, prolongeant le tube souple ; métallique.
- Machine agitatrice ; électrique.

- Règle de mesure.
- Piston taré, dont la masse mobile est de 100 g : son diamètre d est légèrement inférieur à celui D des éprouvettes.
- Et aussi le matériel d'usage courant non spécialisé : tamis, spatule, récipients divers, Balance, chronomètre.

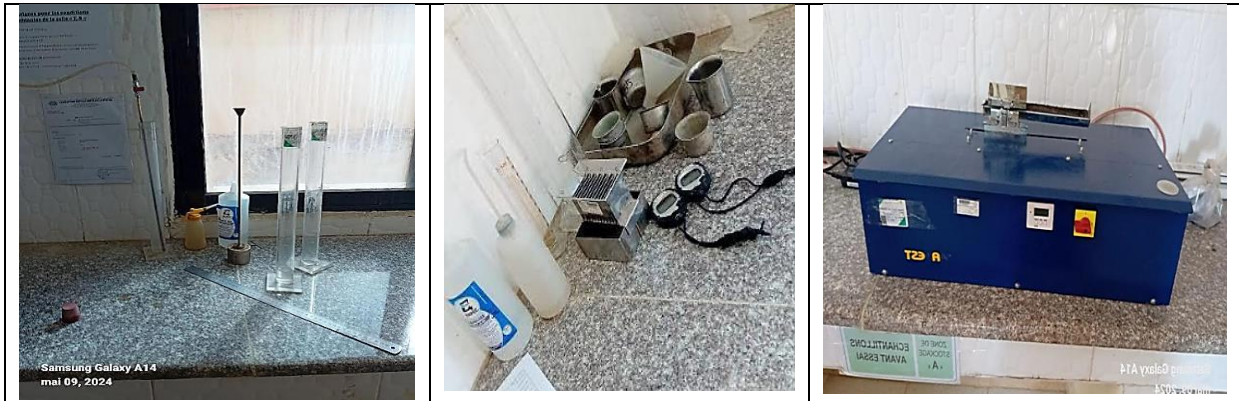


Figure III.8. Matériels utilisés d'équivalent de sable

III-5-3 Mode opératoire

Le matériel et le sable lavé étant préparés, on effectuera les opérations suivantes :

La solution lavante est versée dans la boîte de cinq litres situés à un mètre au-dessus du fond des expériences, le dispositif si phonique est activé et il est connecté au tube laveur.

Dans le cadre de l'étude, deux échantillons propres seront utilisés et la moyenne des deux résultats sera réalisée.

Remplissez progressivement les échantillons d'eau.

Incorporer le sable (environ 120 g), puis laisser reposer pendant une durée de 10 minutes.

Les éprouvettes doivent être fermées et agitées à 90 reprises dans le sens horizontal, puis remplacées verticalement.

Appliquer une solution lavante sur le sable, puis laisser reposer l'ensemble pendant 20 min.

Mesurer la hauteur du sable propre (H2) et la hauteur du sable propre + éléments fins (H1). La détermination de (H2) n'est pas toujours simple, ce qui entraîne la recherche de la mesure la plus précise : [ES].

Déposer le piston de manière lente dans l'expérience jusqu'à ce qu'il se trouve sur le sédiment, le maintenir en place et mesurer (H2).

L'équivalent de sable (SE) $= (H2/H1) \times 100$.

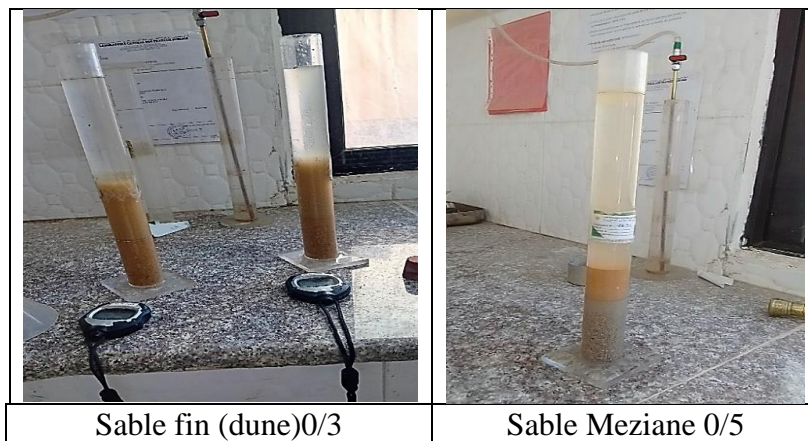


Figure III.9. L'équivalent de sable

Tableau III.10. Équivalent de sable 0/5

Calcul et expression des Résultat	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette $M_T(g)$	122,2	122,2
H1 (mm)	148	144
H2(mm)	89	90
$(H2/H1) \times 100$	60,1	62,5

Vérification de l'essai

La différence du rapport SE entre deux éprouvettes : $2,4 \leq 4$

L'équivalent de sable : SE = 61

Tableau III.11. Équivalent de sable 0/3

Calcul et expression des Résultat	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette $M_T(g)$	122,2	122,2
H1 (mm)	159	159
H2(mm)	88	86
$(H2/H1) \times 100$	55,34	54,08

Vérification de l'essai :

La différence du rapport SE entre deux éprouvettes : $1,26 \leq 4$

L'équivalent de sable : SE = 55

III-6 Masse volumique apparente ρ_p « NF EN 1097-3 (Aout 1998) »

Les granulats doivent être séchés à $(110 \pm 5) ^\circ C$ jusqu'à masse constante.

La masse de chaque éprouvette M_0 doit être comprise entre 120 % et 150 % de la masse nécessaire pour remplir le conteneur.

La masse volumique réelle ρ_p doit être déterminée selon l'EN 1097-6.

La masse volumique en vrac :

M_0 : la masse de l'éprouvette (prise d'essai) (kg).

M_1 : la masse du conteneur vide (kg).

M2 : la masse du conteneur et de l'éprouvette (kg).

$v = 0,943 \text{ L}$

Tableau III.12. La masse volumique apparent.

Les granulats	Sable 0/5	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
M ₀	1,594	1,518	1,359	1,405
M ₁	4,825	4,825	4,825	4,825
M ₂	6,419	6,343	6,184	6,209
La masse volumique apparent	1,69	1,61	1,44	1,49

III-7 Masse volumique absolue ρ_a

La température du bain d'eau doit être $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$;

M1 : masse des granulats saturés et superficiels secs dans l'air ;

M2 : masse d'eau du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés ;

M3 : masse dans l'eau du panier vide ou masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement ;

M4 : masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air ;

PW : masse volumique de l'eau à la température enregistrée lorsque M2 a été déterminé ;

T1 : température de l'eau dans le pycnomètre avant d'immerger la prise d'essai.

$$\rho_a = \rho_w \times \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_1)}$$

Tableau III.13. Masse volumique absolu

Les granulats	Sable 0/5	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
M4 (g)	506,0	506,3	1007,0	2000,9
M3 (g)	1490,9	1489,5	1488,0	706,26
M2 (g)	1803,4	1803,4	2114,8	1971,38
La masse volumique absolu (T/m ³)	2,61	2,63	2,70	2,72

III-8 Détermination de la résistance à la fragmentation par la Méthode de LOS ANGELES « NF EN 1097-2 (Avril 2020) »

L'essai Los Angeles utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d'un gravillon et des granulats pour ballast ferroviaire, elle s'applique aux granulats naturels et artificiels utilisés dans le bâtiment et les travaux publics.

- La température de séchage dans l'étuve est de $110 \pm 5 ^\circ\text{C}$.

-Tamisage selon EN 933-1 :

L'exécution du tamisage est considérée comme achevée lorsque le refus ne change pas plus de 1 % en 1 min de tamisage.

Il faut répéter l'essai lorsque la somme de la masse refus m et restant dans le fond du tamis diffère de plus de 1 % de la masse m_0 .

-La masse mesurée doit être enregistrée au gramme entier le plus proche.

- Calcul LA pour gravillons :

m : état la masse du refus à 1,6 mm en g .



Figure III.10. Essai de LOS ANGELES

Tableau III.14. Valeur de LA

Masse de la fraction 10/11,2 (g)	2000
Masse de la fraction 11,5/14 (g)	3000
Masse de la prise d'essai	5000
Masse refus sur le tamis 1,6mm	4042,2
Valeur de Los Angeles LA	19

$M_0 = 15014g$

III-9 Détermination des résistances des ciments « NF EN 196-1 (sept .2016) »

Cette procédure décrit la méthode pour évaluer la résistance à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment. Elle est également utilisée pour vérifier la conformité de la résistance à la compression d'un ciment par rapport à ses spécifications. De plus, elle sert à tester la validation d'un sable normalisé. Pour une gâchée de 3 éprouvettes, peser :

(450 ± 2) g de ciment ;

(1350 ± 5) g de sable normalisé ;

(225 ± 1) g d'eau distillée.

Des éprouvettes prismatiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3)$ ont été préparées pour les essais mécaniques dans un malaxeur semi-automatique conformément à la norme EN 196-1.



Figure III.11. Moules prismatiques (4 x 4 x 16 cm³)

Lors des tests de ciment, nous employons une table vibrante afin de le comprimer de manière mécanique et de retirer les bulles d'eau.



Figure III.12. Table vibrante

Les moules sont placés dans une chambre d'humidité à une température de 20 ± 2 °C et une humidité de 90% pendant 24 heures. Ensuite nous exposons les échantillons à l'air afin de leur apporter de l'humidité.



Figure III.13. Chambre d'humidité



Figure III.14. Les échantillons à l'air

Dans un premier temps, les tests sont réalisés en flexion sur une presse avec une charge de $50\text{N/s} \pm 10\text{N/s}$.



Figure III.15. La presse de flexion

On réalise les tests de compression à l'aide d'une presse de type Perrier à un chargement de $2400\text{N/s} \pm 200\text{N/s}$.



Figure III.16. La presse de compression

Les résultats de l'essai de flexion et compression de tous les échantillons dans tableau suivant :

Tableau III.15. Résultats de flexion et compression

Résistance	Flexion	(MPa)			Compression	(MPa)	
	2 jours	7 jours	28 jours		2 jours	7 jours	28 jours
1 ^{ère} échantillons	3,36	5,49	5,01		16,16	27,64	38,79
2 ^{ème} échantillons	3,42	4,33	5,08		14,65	27,17	40,72
3 ^{ème} échantillons	3,79	4,16	4,54		16,77	26,22	38,66

III-10 Formulation du béton ordinaire (Méthode de Faury)

Lorsqu'on fabrique un béton, il est nécessaire de choisir des composants appropriés, puis d'optimiser leurs proportions pour obtenir un mélange qui présente deux qualités essentielles : la résistance et l'ouvrabilité.

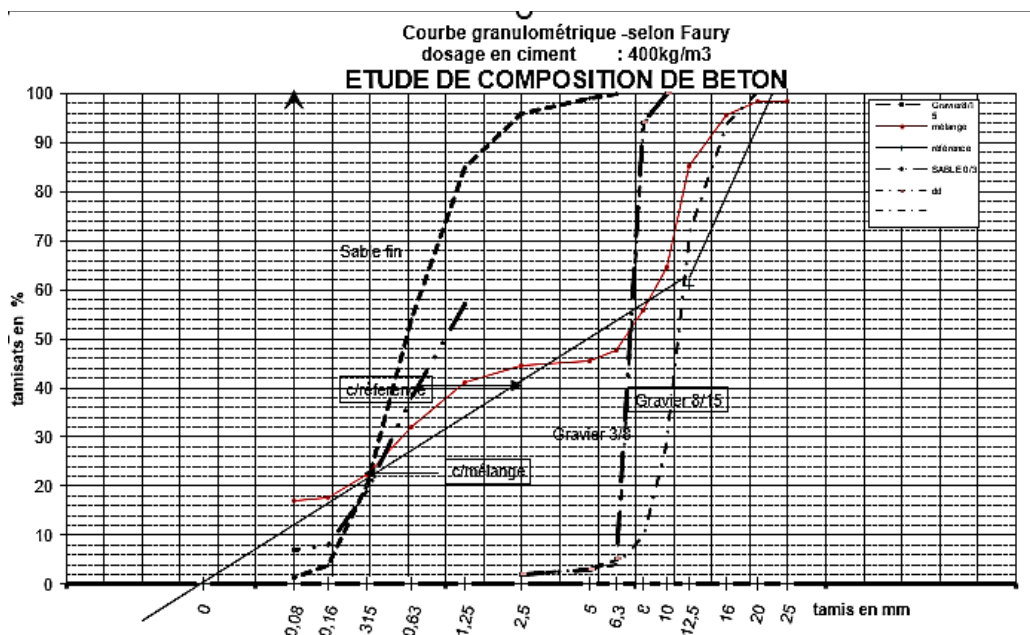
La méthode de composition proposée par Faury a été choisie pour notre étude pour deux raisons principales :

- Cette méthode est applicable à tous les granulats, quelle que soit leur masse volumique.
- Son principe repose sur la loi de continuité des courbes granulométriques, ce qui signifie que lorsque l'on remplace un pourcentage de granulats naturels par un même pourcentage de granulat appartenant à la même fraction, on conserve au maximum l'aspect et la continuité de ces courbes.

$$Dc = 16 + (16 - 12,5) \times \frac{X}{Y} = 16,95 \text{ mm}$$

$$X = (Dc/2) = 8,48 \text{ mm}$$

$$Y = 94\%$$



Y_c est le point d'intersection des deux segments de droite de la courbe de référence et est l'ordonnée Y . La formule suivante calcule sa valeur en tenant compte de la nature des granulats, de la consistance souhaitée, ainsi que de la puissance de vibration et des dimensions du coffrage.

A est le coefficient qui dépend de la nature des granulats et de la consistance visée du béton.

d_1 est la dimension du premier tamis refus : 16 mm.

d_2 est la dimension du tamis immédiatement inférieure à D_1 : 12,5 mm.

$A = 31$

$K = 0,34$

X est le refus en % du tamis $d_1 = 6\%$.

Y est tamisé d_1 -tamisé $d_2 = 22\%$.

III- 11 Composition de béton

III-11-1 Pourcentages des constituants

D'après la courbe granulométrique on a :

% de sable : 29%

% de gravier 3/8 : 6%

% de gravier 8/15 : 47%

% de ciment : 16,5 %

III-11-2 Calcul de la composition de 1m^3 de béton

Tableau III.16. Compositions du béton utilisé et leurs caractéristiques.

Désignation	Poids spécifiques (kg/m^3)
Sable 0/3	611
Sable 0/5	
Gravier 3/8	127
Gravier 8/15	1024
Ciment	400
Eau (L)	193
Rapport E/C	0,48
Rapport G/S	1,70
Masse volumique M_v (kg/m^3)	2354,9

III-11-3 Les caractéristiques de béton durci

Un essai de compression appliquer sur une éprouvette cubique de dimensions $(15 \times 15 \times 15) \text{ cm}^3$ à 7 jours « NF EN 12504-1 ».

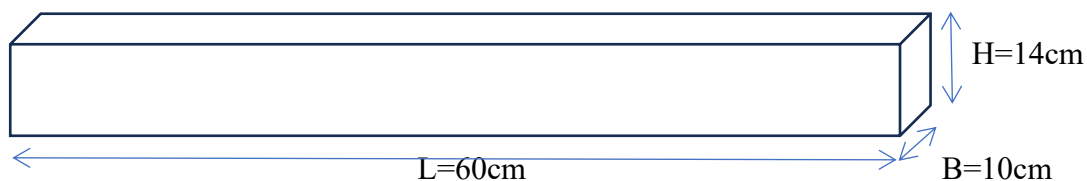


Figure III.18. Essai de compression a 7 jours

Tableau III.17. Caractéristiques du béton durci à 7 jours

Poids de l'éprouvette (Kg)	10,32
Force maximum (KN)	702,693
Contrainte maximum (MPa)	31,231

III-11- 4 Calcul le volume d'éprouvette



$$V_{\text{éproutette}} = B \times H \times L$$

$$V_{\text{éproutette}} = 10 \times 14 \times 60 = 8400 \text{ cm}^3$$

$$M_{\text{éproutette}} = M_v \times V_{\text{éproutette}} = 0,0084 \times 2354,9 = 19,78 \text{ kg} = 19783,69 \text{ g}$$

III-11-5 Calcul les masse des agrégats

$$M(\text{expérience}) = \frac{M(\text{théorie}) \times M_{\text{épreuve}}}{M_v}$$

Tableau III.18. Masse des agrégats d'un éprouvette

Désignation	Les masses (g)
Sable 0/3	2566,52
Sable 0/5	2566,52
Gravier 3/8	1066,93
Gravier 8/15	8602,69
Ciment	3360,42
Eau (L)	1621,40

III-11-6 Présentation d'éprouvettes utilisées

Les éprouvettes prismatiques normalisées de dimensions 10x14x60 cm³ pour la détermination des résistances à la flexion 4 points. Pour prévenir l'effritement et simplifier le démoulage des éprouvettes, les moules sont recouverts d'huile appliquée à l'aide d'un pinceau.



Figure III.19. Éprouvettes prismatiques

III-12 Protocole expérimental

III-12-1 Les dimensions des poutres

Dans ce protocole expérimental (18) poutres de section (140 x 100) mm² avec une longueur de 600 mm ont été réalisées :

Poutre témoin

Première variante : 3 poutres en béton ;

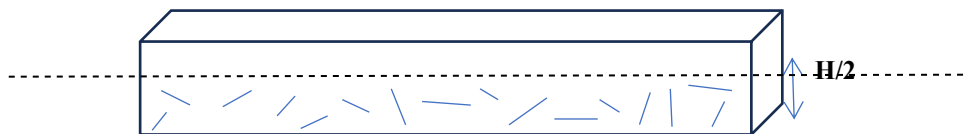


Poutre renforcée : 15 poutres en béton renforcée par des fibres métallique ;

Ces poutres ont été divisées en 5 variantes :

Deuxième variante : 3 poutres remplis entière à 1,5% de fibres ;

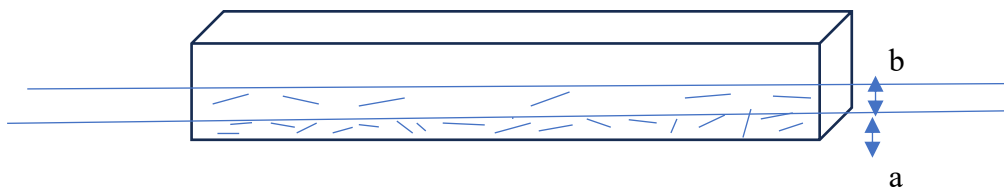
Troisième variante : 3 poutres contiennent la moitié inférieure 100% de 1,5% de fibres ;



Quatrième variante : 3 poutres contiennent

b: contient 30% de 1,5% de fibres ;

a : contient 70% de 1,5% de fibres ;



Cinquième variante : 3 poutres contiennent

b: contient 20% de 1,5% de fibres ;

a: contient 80% de 1,5% de fibres ;

Seizième variante : 3 poutres contiennent

b : contient 0% de 1,5% de fibres ;

a : contient 100% de 1,5% de fibres.

III-12-2 Dosage des fibres

La masse volumique de fibres :

$$Mv_{\text{fibre}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$$

On choisit le volume de la 3ème variante pour calculer la quantité de fibre pour chaque éprouvette

Tableau III.19. Dosage de fibres

Les variantes	Volume qui contient de fibres (cm ³)	Volume qui contient 1,5% de fibres (cm ³)	Masse de fibres 1 poutre (g)
1 ^{ère} variante	0	0	0
2 ^{ème} variante	8400	126	491,4
3 ^{ème} variante	4200	63	M =491,4
4 ^{ème} variante	V1=2100 V2=2100	V1= 31,5 V2=31,5	M1=147,42 M2=343,98
5 ^{ème} variante	V1=2100 V2=2100	V1= 31,5 V2=31,5	M1=98,28 M2=393,12
6 ^{ème} variante	V1=2100 V2=2100	V1= 31,5 V2=31,5	M1=0 M2=491,4

III-13 Confection du béton

III-13-1 Préparation des matériaux utilisé

Préparation des matériaux utiliser dans le béton : les sables, les graviers, les fibres, l'eau de gâchage.



Figure III.20. Matériaux utilisés

III-13-2 Malaxage et mise en œuvre

Le processus de fabrication du béton a été effectué dans un malaxeur à axe vertical utilisant des mouvements planétaires. Il est conseillé d'utiliser un temps minimum afin de garantir l'uniformité du mélange.



Figure III.21. Malaxeur

- Verser le sable, le gravier et le ciment dans le malaxeur et le mettre en marche pendant environ 1 minute jusqu'à ce qu'ils soient homogènes.
- Ajouter l'eau de gâchage au mélange et la laisser s'intégrer pendant 2 minutes.

III-13-3 Mesure de l'affaissement

On pose le béton dans le cône et pique chaque couche avec 25 coups à l'aide d'une tige, on arase le cône avec une tige, on le lève immédiatement verticalement et doucement en le tournant légèrement pour le démouler, on mesure l'affaissement du béton frais.

L'affaissement égale 10 cm, le béton est très plastique.



Figure III.22. Mesure d'affaissement.

III-13-3 Remplissage et vibration

-Tout d'abord, nous versons le béton dans un grand récipient et mesurons sa température.



Figure III.23. Le béton

- Nous plaçons le béton dans les moules en deux ou trois couches, selon l'emplacement des fibres.
- mettre la quantité de fibres qui est utilisé de chaque variante puis bien les mélanger jusqu'à ce qu'elles soient homogènes.
- chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de tige.



Figure III.24. Malaxage et vibration de béton fibré

III-13-4 Le démoulage

-Le démoulage est effectué après 24 heures en utilisant divers outils de démoulage tels que des clés, des marteaux tournants et des marteaux tourne-vice.



Figure III.25. Démoulage des éprouvettes

-Une fois démoulées, toutes les éprouvettes sont placées dans une chambre humide de 20°C pendant une période de 28 jours, comme mentionné précédemment.



Figure III.26. Préservation des éprouvettes dans chambre humide pendant 28 jours

III-14 Procédures d'essais (essai de flexion)

On a mesuré la résistance à la traction par flexion en utilisant une machine de flexion 4 points, de type (3R RP200), avec une capacité de 200KN. Le chargement a été exécuté pour contrôler le déplacement à une vitesse de 0.05Mpa/s. Dans la machine, on mesure la flèche à mi-portée en utilisant un capteur automatique. Conformément à la norme NF EN 12390-5(Avril 2012), La distance entre appuis supérieur est 150cm et appuis inférieurs est 450cm. On a enregistré les valeurs de la force verticale et le déplacement correspondant en même temps.

- 1 Rouleau de chargement (rotatif, inclinable) ;
- 2 Rouleau d'appui ;
- 3 Rouleau d'appui (rotatif, inclinable).

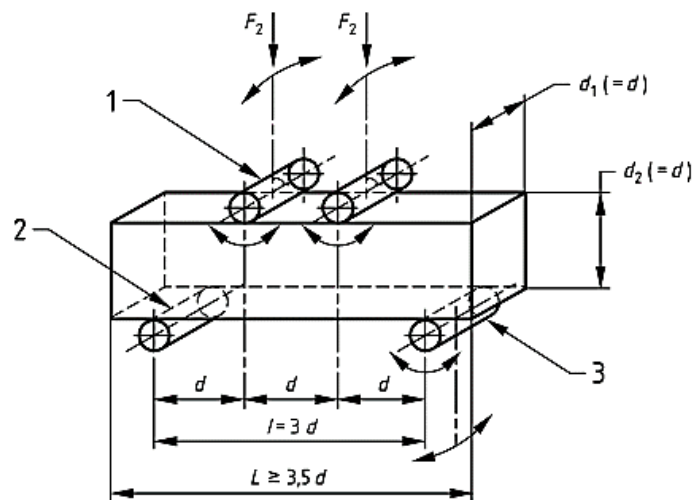


Figure III.27. Appareil de chargement (charge en deux points) [73]

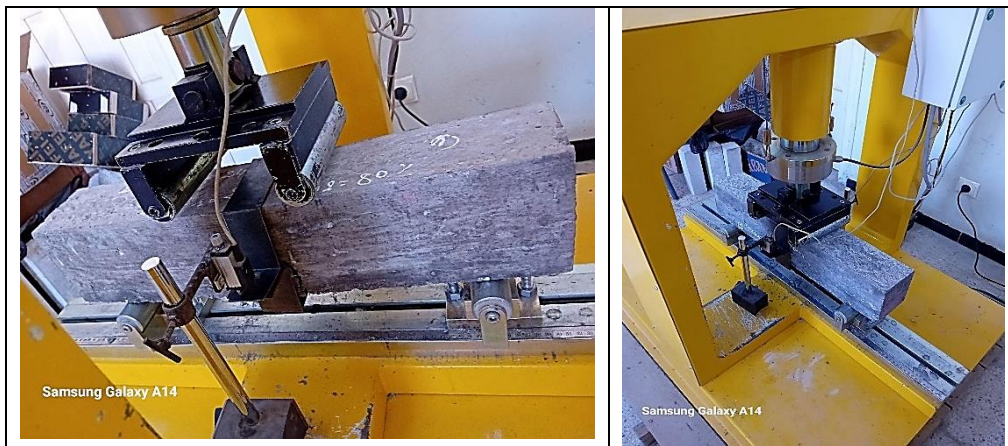


Figure III.28. Configuration du test de flexion en 4 points

Conclusion du chapitre

Au sein de ce chapitre, nous avons exposé la procédure expérimentale utilisée pour la confection des éprouvettes en béton fibré pour le programme d'essais, Le chapitre suivant présentera les divers résultats des essais mécaniques à la flexion sur quatre points obtenus.

Chapitre IV

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Introduction

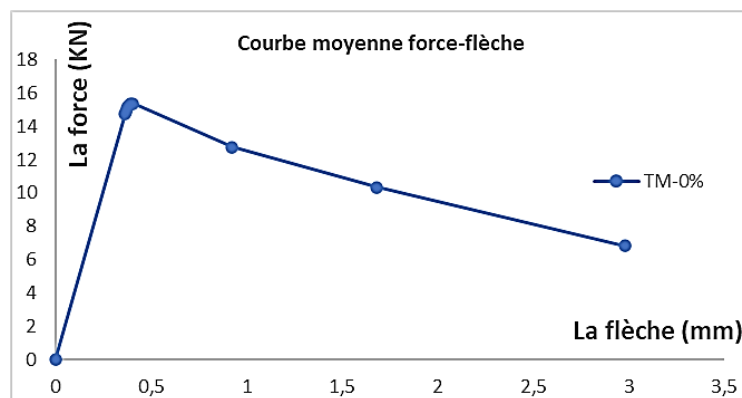
Dans ce chapitre, nous aborderons la présentation et l'analyse des résultats expérimentaux concernant le béton témoin et les six (06) variantes de bétons de fibres considérés dans cette étude. Cette approche est suggérée afin d'évaluer l'apport de ces fibres provenant de l'industrie de récupération et de déterminer ainsi la meilleure option d'utilisation de ces fibres dans la section de la poutre, en termes de résistance.

Les résultats des essais de flexion 4 points sont représentés sur des tableaux et des courbes afin de pouvoir faire procéder à l'interprétation des résultats d'une manière adéquate.

IV-1 Résultats et discussion

Tableau IV.1. Résultats des essais de flexion.

Le variante	Pourcentage des fibres (%)	Force (KN)	Emplacement des fibres
Poutre témoin(p-Réf)	1,5	15,35	-
Poutre en BAF (P-HT)	1,5	16,17	H
Poutre mi-hauteur (PH/2)	1,5	16,53	H/2
Poutre multi couche (P- a70%b30%)	1,5	17,48	a 70%&b30%
Poutre multi couche (p- a80% b20%)	1,5	18,74	a 80%&b20%
Poutre multi couche (p- a100%b 0%)	1,5	24,03	a100%&b0%

Variante 1 : Poutre témoin (P- Réf)**Figure IV.1.** Courbe force -flèche de la poutre témoin (P-Réf)**Figure IV.2.** Mode de rupture de la poutre témoin (P-Réf)

D'après les figures IV.1 et IV.2, on constate que le comportement est typique fragile de la poutre en béton ordinaire. Dès le début du chargement jusqu'à la valeur de la résistance maximale de 15,35 KN, la courbe est linéaire, puis une chute rapide de la résistance jusqu'à la rupture finale de la poutre. Une seule fissure magistrale est observée au milieu de la poutre.

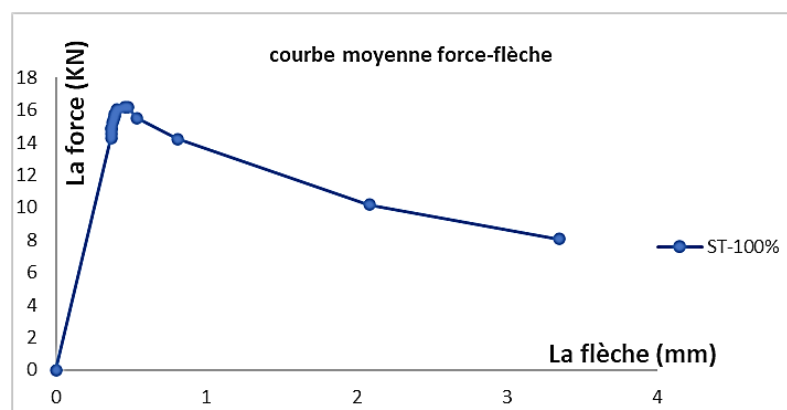
Variante 2 : Poutre en BAF : Section Totale (P-ST)**Figure IV.3.** Courbe force -flèche de la poutre en BAF (P-ST).



Figure IV.4. Mode de rupture de la poutre en BAF (P-ST).

D'après la figure IV.3, on constate que le comportement est toujours fragile. La résistance maximale de 16,17 Incomparativement à la poutre témoin, on a une faible amélioration de 5,3 %. On obtient également le même mode de rupture (rupture au milieu de la poutre). Cette variante ne peut être justifiée économiquement (gains faibles par rapport au taux de réalisation).

Variante 3 : Poutre mi-hauteur (P-MH)

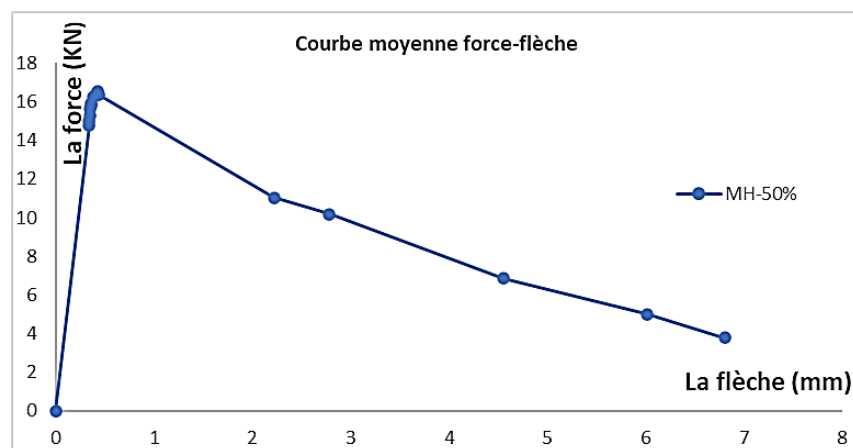


Figure IV.5. Courbe force -flèche de la poutre mi-hauteur (P-MH).



Figure IV.6. Mode de rupture mi-hauteur (P-MH)

La figure IV.5 montre que la rupture est toujours localisée au milieu de la poutre, sauf qu'une légère ductilité apparaît juste à la fin du domaine élastique. La résistance maximale de 16,53 KN comparativement au faisceau témoin de l'amélioration est de 7,6 %.

Variante 4 : Poutre multi couche (P- a70%b30%)

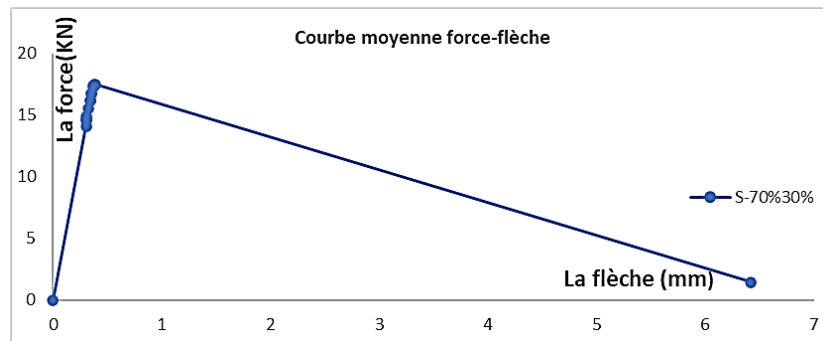
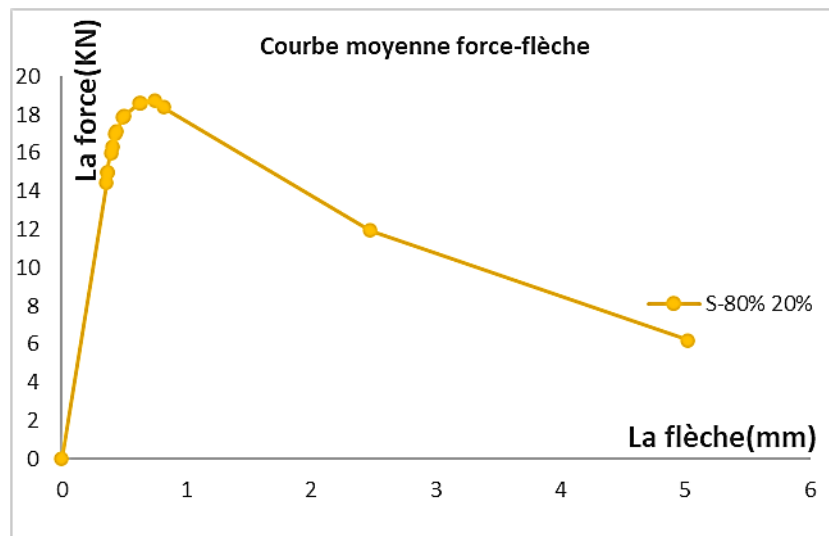


Figure IV.7. Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (P- a70%b30%).



Figure IV.8. Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- 70% 30%).

Pour cette variante, on obtient presque le même résultat de la variante précédente, en termes de la résistance et du mode de rupture. La résistance obtenue est de 17,48 kN, ce qui donne une augmentation de 13,5 préférentiellement apportée au faisceau témoin.

Variante 5 : Poutre multi couche (p- a80% b20%)**Figure IV.9.** Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (p- a80% b20%).**Figure IV.10.** Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- 80% 20%).

D'après la figure IV.9 et la figure IV.10., sur le même comportement linéaire jusqu'à une certaine limite des résistances proche de la valeur ultime de 18,74 kN, ce qui correspond à un taux d'amélioration de 22 % de la valeur de résistance par rapport à la poutre témoin, la fissure et la rupture sont toujours obtenues au milieu de la poutre.

Variante 6 : Poutre multi couche (p- a100%b 0%)

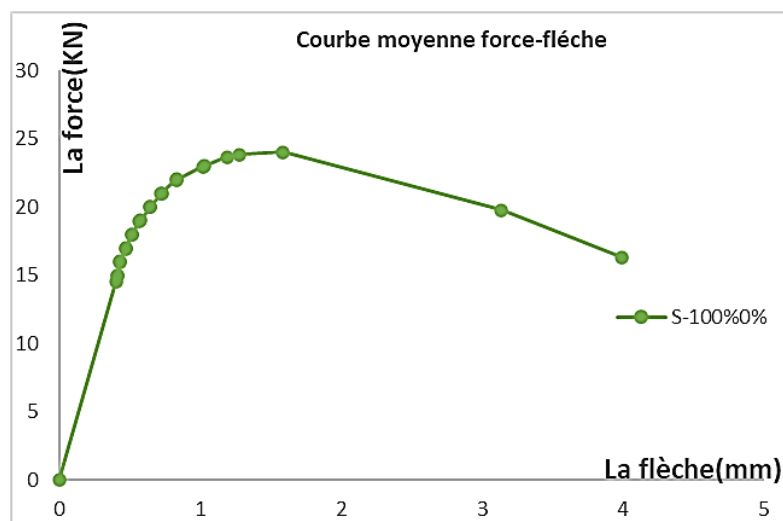


Figure IV.11. Courbe force -flèche de la Poutre multi couche (p- a100%b 0%).



Figure IV.12. Mode de rupture de la Poutre multi couche (p- a100%b 0%).

La figure IV.12 montre un champ de fissuration, néanmoins la rupture est toujours obtenue au milieu de la poutre. La résistance maximale est de 24,03 KN, ce qui représente un taux d'amélioration de 56,5 %.

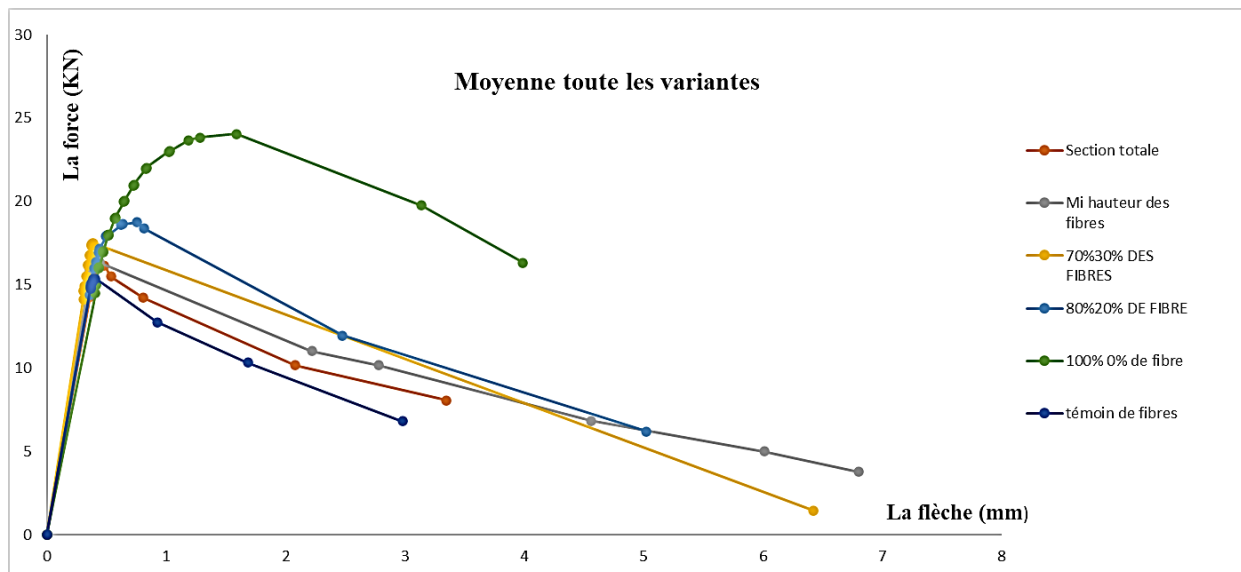


Figure IV.13. Courbe force -flèche pour toutes les variantes

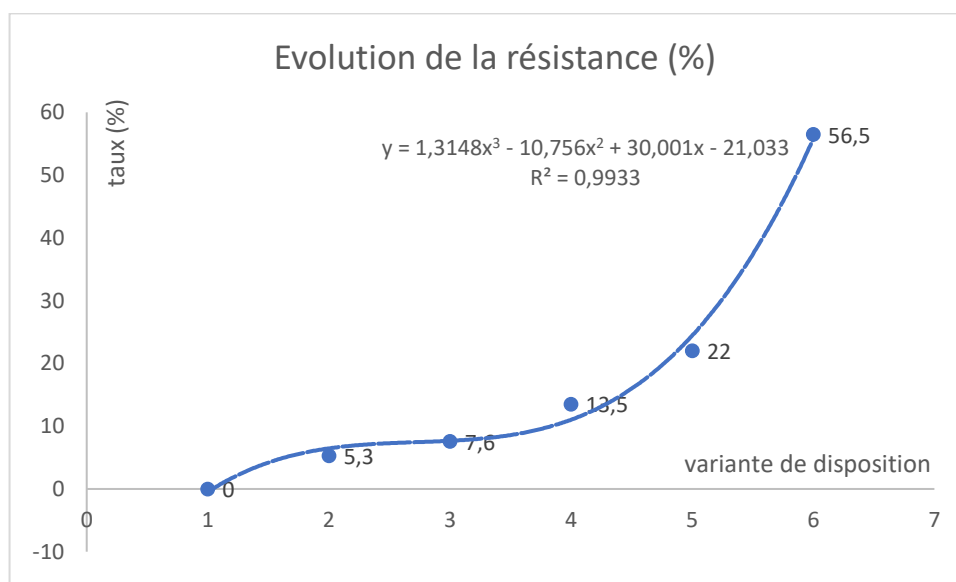


Figure IV.14. Courbe évolution de la résistance.

La figure IV.14 illustre le taux de variation des différentes variantes considérées et met en évidence une amélioration assez conséquente de la résistance pour une disposition combinée (p- 80 %- 20 %) et un renforcement total de la couche la plus tendue de la poutre d'une valeur de 100 %, en considérant la même quantité de fibres.

Conclusion de chapitre

Les différents résultats obtenus mettent en évidence l'influence de la disposition de la quantité de fibres dans la poutre. En effet, le renforcement des parties tendues de la poutre donne un meilleur résultat en termes de résistance. Pour la même quantité de fibres, la résistance ultime varie selon la disposition de cette quantité de fibres. Le recours à la disposition combinée peut améliorer la capacité portante des éléments, ce qui induit un meilleur comportement vis-à-vis des sollicitations de flexion. Il serait préférable de considérer également la variation de la fraction volumique pour définir la combinaison adéquate à considérer.

Conclusion générale

Conclusion générale

Avant d'entamer les essais expérimentaux, un travail bibliographique approfondi a été mené, couvrant divers aspects des constituants du béton, la formulation des bétons, et les propriétés et applications des fibres métalliques. Les principaux points de cette revue sont :

Les constituants du béton : Une analyse détaillée des ciments, granulats, sables, adjuvants et l'eau de gâchage, incluant leurs types, classifications et caractéristiques physiques.

La formulation des bétons : Plusieurs méthodes de formulation, dont celles de Dreux-Gorisse, Bolomey, Faury, La Valette et Joisel, ont été présentées.

Types et propriétés mécaniques des fibres : Une discussion sur les différents types de fibres (amiante, verre, carbone, polymères, acier) et leurs effets sur les propriétés du béton, notamment la résistance à la compression, l'abrasion, et les applications pratiques.

Ce travail bibliographique a fourni une base théorique solide pour comprendre les mécanismes influençant la résistance des poutres renforcées de fibres métalliques, et a soutenu les conclusions expérimentales en montrant l'efficacité des dispositions multicouches et du renforcement ciblé.

Ce travail expérimental a permis de mettre en lumière l'impact significatif de la disposition des fibres métalliques sur le comportement mécanique des poutres en béton, en particulier sous sollicitation de flexion. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

Poutre témoin (P-Réf) : La poutre en béton ordinaire présente un comportement typiquement fragile, caractérisé par une courbe de charge-déformation linéaire jusqu'à une résistance maximale de 15,35 kN, suivie d'une chute rapide de la résistance jusqu'à la rupture. Une fissure principale a été observée au milieu de la poutre.

Poutre en BAF - Section Totale (P-ST) : Bien que cette variante présente une résistance maximale légèrement supérieure à celle de la poutre témoin (16,17 kN, soit une augmentation de 5,3 %), son comportement reste fragile. L'amélioration obtenue est modeste et ne justifie pas économiquement son adoption en raison des faibles gains par rapport aux coûts de réalisation.

Poutre mi-hauteur (P-MH) : Cette configuration montre une légère ductilité apparaissant en fin de domaine élastique, avec une résistance maximale de 16,53 kN, ce qui représente une amélioration de 7,6 % par rapport à la poutre témoin.

Poutre multicouche (P-a70%b30%) : Les résultats de cette variante sont proches de ceux de la variante précédente, avec une résistance maximale de 17,48 kN, soit une augmentation de 13,5 % par rapport à la poutre témoin.

Poutre multicouche (P-a80%b20%) : Cette configuration présente une résistance maximale de 18,74 kN, correspondant à une amélioration de 22 % par rapport à la poutre témoin, tout en conservant un comportement linéaire jusqu'à la limite ultime.

Poutre multicouche (P-a100%b0%) : Cette variante montre un champ de fissuration au milieu de la poutre, avec une résistance maximale de 24,03 kN, soit une amélioration significative de 56,5 % par rapport à la poutre témoin.

Les différentes configurations testées démontrent que la répartition graduelle des fibres métalliques améliore de manière substantielle la résistance ultime des poutres, avec des résultats particulièrement prometteurs pour les dispositions combinées. Le renforcement des zones tendues de la poutre permet d'obtenir une meilleure performance face aux sollicitations de flexion.

Pour des applications futures, il est recommandé de poursuivre les recherches en explorant diverses combinaisons de pourcentages volumiques de fibres afin d'optimiser davantage les performances des poutres en béton armé de fibres métalliques. L'utilisation de configurations multicouches et la disposition stratégique des fibres constituent des méthodes prometteuses pour améliorer la capacité portante et la durabilité des structures en béton.

Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] **Z.D-Mihaela, G. V Adam, V .Vlasin.** "À Propos Du Mot Roumain Străin «Étranger», De Son Origine Et De Son Histoire." Dacoromania 28.2 (2023).
- [2] **L. Schwartzentruher, J.M. Torrenti.** "Le grand livre des bétons." (2014).
- [3] **R .Lafuente, G. Gluais.** "le délavage du béton de pieux moules dans le sol." bull. Liais. Lab. Ponts chauss. 62 (1972).
- [4] **F. Vincent, I. Lafarge.** "Le musée du Plâtre (Deuil-la-Barre, Val-d'Oise) à 40 ans, l'âge de se réinventer. Entretien avec Vincent Farion, son directeur. À propos du seul musée en France dédié au matériau plâtre." e-Phaistos. Revue d'histoire des techniques/Journal d'histoire des techniques 12.XII-1 (2024).
- [5] **L. D. A. Schwartzentruher, J. M. Torrenti** « Le grand livre des bétons » (2014)., 453p
- [6] **S. Boutouata, C. Haouam, A. Encadre par Messabhia,** « Etude de l'influence des ajouts des adjuvants et le mode de séchage sur la résistance du béton ». Diss. 2020.
- [7] **D. Benamrane,** « L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton ». Diss. 2017.
- [8] **A. Charef,** "La problématique des granulats au Maroc." Push-Button Publie (2007).
- [9] **A. Braiima,** « Béton », Université De Blida l'institut De Génie Civil.
- [10] **L. Ambroise, al.** "From buildings' end of life to aggregate recycling under a circular economic perspective: A comparative life cycle assessment case study." Sustainability 13.17 (2021).
- [11] **K. Chester, Wentworth,** «A scale of grade and class terms for clastic sediments." The journal of géologie 30.5 (1922).
- [12] **G. J. Dieudonné kiki** « Amélioration De L'efficacite Energétique Des Bâtiments Publics Du Sud Du Benin Par Utilisation Des matériaux Biosources Locaux » Thèse de Doctorat en cotutelle Soutenu publiquement le 29 mars 2023 à Arlon (Belgique).
- [13] **P. Bédard** « Clef d'identification visuelle des grains de sable » 2014 (version 1,0).

- [14] **A. Colbaut** "Le sable à vert : constituants, préparation, moulage et recyclage." Fonderie, Fondeur d'aujourd'hui 266 (2007) : 41-43.
- [15] **R. Sauterey, J. Bonnot.** "Traitement Des Sables Pour Assises De Chaussées." Rev Gen Routes Aerodr 534 (1977).
- [16] **J. Rognon,** "Vers une agriculture flottante : faire face à la diminution des ressources de la pêche dans les villages sur pilotis du Tonlé Sap (Cambodge)." (2023).
- [17] **M. Duriez,** Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) « <http://www.national-academies.org/> » 1972.
- [18] **A. Braïma,** « Béton », Université De Blida l'institut De Génie Civil.
- [19] **CH. GHERDAOUI ,** "Influence des fines minérales sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton à base de sable de carrières de la région de Guelma." Mémoire de Magister, Université Badji M.-Annaba (2007).
- [20] **C. Gatumel et Al.,** « Science et technologie des poudres [archive] », sur Ecole des Mines d'Albi, 2 juillet 2019 (consulté le 27 novembre 2023).
- [21] **R. Malcolmson, D. Greenhalgh** « Membranes à haute teneur en eau » dans le processus d'approbation des demandes de brevet Publie 1 June 2012.
- [22] **A. Marchi , Thibaut, et Al.** "Influence de la résistance du béton parent sur la qualité des granulats recyclés." NoMad 2018-Nouveaux Matériaux et Durabilité. 2018.
- [23] **Neville, N. Adam** « Propriétés des bétons ». Eyrolles, 2000.
- [24] **F. GABRYSIK,** "Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2", Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/ .
- [25] **Norme Française XP P 18-598,** "Granulats- Equivalent de sable", AFNOR, (1991).
- [26] **N. Bourmatte, and H. Hacène** « Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques ». Diss. Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2017.
- [27] **Norme Française XP P 18-591,** "Granulats - détermination de la propreté Superficielle", AFNOR, (1990).
- [28] **D. BENAMRANE,** L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton. Diss. 2017.

- [29] **R. Dupain, R. Lanchon et JC. Saint-Arroman.** "Granulés, sols, ciments et bétons."
- [30] **W. Aissaoui,** « Etude expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats en caoutchouc." (2018).
- [31] **A. Amrane, H. Haddad,** « l'influence de la margine d'olive sur les caractéristiques physico-mécanique du béton ». Université Abderrahmane Mira de Bejaia Faculté de la Technologie Département de Génie civil 2015-2016.
- [32] **W. Aissaoui,** « Etude Expérimentale des propriétés mécaniques des bétons élaborés à base de granulats ». L'Université 8 Mai 1945 Guelma Mémoire de Master en caoutchouc Juin 2018.
- [33] **B. Caillard** « Pour une construction sans défauts » « Le grand guide de la maçonnerie ». <https://maconnerie.bilp.fr/guide-general>.
- [34] **P. Guiraud** « INFO ciment » <https://www.infociments.fr/>. avril 2018.
- [35] **D. Georges, J. Festa.** « Nouveau guide du béton ». Eyrolles 1976.
- [36] **H. Athamnia, L. Benhamida,** "Caractérisation de l'ouvrabilité des mortiers et des bétons." (2013).
- [37] **M. Ait Ameer,** "Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales." Mémoire de magister, U Tiaret (1998).
- [38] **G. Debicki,** "Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration du matériau." (1992) .
- [39] **A.K Bledzki, G. Jochen.** "Composites reinforced with cellulose based fibres." Progress in polymère science 24.2 (1999).
- [40] **J.P Lacour, L. Hugo.** "Prix libre et consommation socialement responsable : application du modèle « Fixez votre propre prix » à une ressourcerie." Décision Marketing 3 (2019).
- [41] **H. Djeziri,** « Incubateur maritime connecté à Ghazaouet ». Diss. Université de Tlemcen, 2021.
- [42] **G. Auray, et al.** "Essais de dallages en béton fibré sur inclusions rigides avec et sans matelas de transfert de charges." 11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur. 2022.

[43] **N.T Trinh, et Al.** "Un nouveau pont ferroviaire entièrement en CFUP." Tracés (2023) : 42-47.

[44] **Nicolas Bertoldi** « Formalisation de la théorie de l'évolution : une approche philosophique et historique » Publié dans Lato Senu Revue de la Société... 27 septembre 2018.

[45] **L. Slesarew, S. Lamar.** "Equilibre Critique De Poutres Planes De Matériau Fragile Fissure." Imme Bol Tec 51 (1975).

[46] **M. Mimoune, B. Bettakh, Fz Mimoune.** "Calcul Des Poutres Mixtes Simplement Appuyées Etude De La Connexion Acier-Béton." Sciences & Technologie, Sciences De L'ingénieur (2008).

[47] **A. Mebarki, M. Pinglot, M. Lorrain.** "Fiabilité Des Poutres Isostatiques En Béton Arme-Sensibilité Aux Paramètres Géométriques, Mécaniques Et De Chargement." Ann Itbtp 443 (B236) (1986).

[48] **Dr N. Djafour Benkelfat et Dr N. Meddane Benmansour** « Calcul Des Structure Hyperstatiques » université de Tlemcen faculté de génie civil 2019.

[49] « Poutre en console » Site internet <https://dimension-d.com/poutres/p0/index.php> .

[50] **M. Kanchana, M. Bharat et K. Syed Jaffar.** "Système de reconnaissance automatique des aliments pour les patients diabétiques." Revue internationale pour la recherche innovante en science et technologie 1 (2015)

[51] **O. Aklouche,** « Réduction des niveaux vibratoires d'un panneau au moyen de trous noirs acoustiques structurés en réseau périodique : conception d'une méta-plaque ». Diss. Le Mans, 2017.

[52] **F. Wurtz,** « Conceptions de la conception pour le génie électrique : de l'approche" Objets-Savoirs-Méthodes-Outils" à l'approche" Systèmes-Connaissances-Compétences-Organisations ». Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.

[53] **N. Bel Hadj Ali,** « Etude de la conception globale des structures en Construction Métallique. Optimisation par les algorithmes génériques ».Thèse de doctorat Génie civil et sciences de l'habitat Chambéry, 2003.

- [54] **C.H. Huang**, « La formation du Sujet sous l’emprise du pouvoir économique: Comparaison entre Shanghai et Taipei ». Diss. Paris 9, 2007.
- [55] **A. Faure, et al.** "Design of thermoelastic multi-material structures with graded interfaces using topology optimization." *Structural and Multidisciplinary Optimisation* 56 (2017).
- [56] **P. Lohmuller**, « Matériaux méso structurés et infiltration métallique avec optimisation du squelette architecturé ». Diss. Université de Lorraine, 2019.
- [57] **C. Dufour, L. Adelheid Hege** «À son 14 e congrès, la confédération ELA présente un projet « plus politique que jamais »." *Chronique Internationale de l'IRES* 2 (2017): 27-39.
- [58] **Al. Dodoee, O. Hashim Hassoon.** « Conception et optimisation des matériaux et structures composites pour des applications navales : effet du claquement ». Insulter. Brest, 2017.
- [59] **J. Collomb**, « Optimisation du processus de dimensionnement thermomécanique de Moule Autonome à Transfert Thermique Efficient pour transformation rapide des matériaux composites à renforts continus ». Diss. Université Grenoble Alpes (ComUE), 2018.
- [60] **M. Tille**, « Analyse de la performance de la géométrie. Réflexions & Propositions » Journée Technique LAVOC-Routes plus sûres ! 2003.
- [61] **L. Dai**, « Contribution à l'estimation de la résistance en flexion de poutres en béton précontraint avec prise en compte de la corrosion d'armature ». Diss. Université de Lorraine, 2019.
- [62] **N. Domedé**, « **Analyse** structurelle des constructions en maçonnerie, du matériau à l'ouvrage ». Diss. INSA de Toulouse, LMDC, 2021.
- [63] **R. Lannoy** « Science Sécurité et gestion des risques 1 » Publie en Sécurité et gestion des Politique Science Sécurité et gestion des risques 1 April 2004 .
- [64] **A. Rouffignac, et al.** "La durabilité de la bioéconomie et des filières biosourcées : outils et enjeux." *Technologie et innovation* 9.1 (2024).
- [65] **C. Poudat, J. Kun, C. Thierry.** « Wiki conflits, un corpus extrait de Wikipédia : principe et méthode d'élaboration ». Diss. LRL, Clermont Ferrand, BCL, Nice, 2014.

[66] S. Kermiche, B. Redjel. "Analyse expérimentale et analytique du comportement en flexion des poutres en béton armé pré fissurées renforcées par un matériau composite en toile de fibres de carbone (TFC)." Synthèse : Revue des Sciences et de la Technologie 25 (2012) : 41-58.

[67] J. Page, M. Boutouil, C. Aesitc, "Etude des propriétés mécaniques d'un béton renforcé par des fibres de lin." Conférence Internationale Francophone NoMaD, Mines Douai, France. 2015.

[68] R. Bouras, S. Kacis, J. C. Roth. "Approche théorique et expérimentale du comportement rhéologique des bétons de fibres métalliques à l'état frais." Rhéologie 9 (2006) : 22-27.

[69] A. ELLOUZE, et al. "Etude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux." Colloque CMEDIMAT. Vol. 6. 2005.

[70] A. Herrera, « Fonctionnement des jonctions âmes-membrures en Béton Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) ». Diss. Université Paris-Est, 2017.

[71] M. Gascon, « Étude du comportement de connecteurs de cisaillement dans du béton fibré à ultra-hautes performances pour la construction de poutres mixtes de ponts ». Diss. École Polytechnique de Montréal, 2016.

[72] document technique d'application référence avis technique 3.3/18-960-V2

NF EN 14889-1 société BEKAERT France.

[73] NF EN 12390-5 Avril 2012