

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

ET DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

Mémoire

N° d'ordre :

N° de série :

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Génie civil
Option : Géo matériaux

Présente par :

GUERMITI LAID

Ingénieur d'état en Génie Civil – C.U.Z.A Djelfa

Thème :

**CONTRIBUTION A L'AMÉLIORATION DE CERTAINES
CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON DE STRUCTURE À BASE DE
SABLE DE DUNE CORRIGÉ ET RENFORCÉ PAR DES FIBRES
MÉTALLIQUES**

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Mr BEBBA AHMED ABDELHAFID	Maitre de conférences (A), U. Ouargla	Président
Mr KRIKER ABDELOUAHED	Professeur, U. Ouargla	Examineur
Mr BEDERINA MADANI	Maitre de conférences (A), U. Laghouat	Examineur
Mr BEN TEBBA Med TAHAR	Maitre de conférences (A), U. Ouargla	Promoteur
Mr HADJOUDDJA MOURAD	Maitre assistant (A), U. Laghouat	Co-Promoteur

Année 2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A celle qu'elle a veillée sur moi pendant toujours, ma chère mère,

A mon très cher père,

A toute ma famille, mes frères, mes sœurs,

A tous mes amis

A tous les enseignants du département de génie civil.

L. GUERMITI

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu **DIEU** Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.*

*J'adresse ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur **M.T.BENTEBBA** directeur de ce mémoire, qui a dirigé ce travail de recherche attentivement et efficacement l'évolution de ce travail.*

*Je remercie mon co-promoteur Monsieur **HADJOUJJA Mourad**, enseignant à l'institut de génie civil au l'université Amar Thlidji de Laghouat pour ses conseils et ses directives.*

*Je remercie vivement Monsieur **A. A .BEBBA**, Maître de conférences à l'Université de Ouargla pour l'honneur qu'il m'a fait présider en acceptant de présider le jury d'examen de ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à messieurs **A. KRIKER**, Professeur à l'Université de Ouargla et Monsieur **M. BEDERINA** Maître de conférences à l'Université de Laghouat pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant d'en être examinateurs.*

A tout le personnel de :

- *Laboratoire de recherche de Génie Civil de l'Université de Laghouat,*
- *Laboratoire de Construction et Environnement de l'ENP (Alger),*
- *Laboratoire du Control technique de construction CTC Sud (Laghouat).*

Enfin, Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation trouveront ici ma profonde reconnaissance.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Résumés	I
Liste des figures	I
Liste des tableaux	IV
Liste des photos	VI
Liste des symboles et abréviations	VII

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PARTIE 01 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES ET LES BÉTONS DE FIBRES

I.1 Introduction.....	01
I.2 Les fibres	01
I.2.1 Les différents types des fibres utilisées et leurs caractéristiques mécaniques.....	01
I.2.1.1 Les fibres métalliques.....	02
I.2.1.2 Les fibres minérales.....	02
I.2.1.3 Les fibres végétales.....	03
I.2.1.4 Les fibres synthétiques.....	03
I.2.2 Choix et Rôles des fibres dans le béton.....	04
I.2.3 Effet du dosage et de l'orientation des fibres d'acier dans le béton	06
I.2.4 Mécanisme du renforcement par les fibres d'acier	08
I.3 Le béton renforcé de fibres	12
I.3.1 Historique du béton de fibres	12
I.3.2 Mécanisme de rupture des bétons de fibres	14
I.3.3 Corrosion des bétons renforcés de fibres d'acier	16
I.3.4 Propriétés mécaniques des bétons renforcés par fibres métalliques	17
I.3.5 Application du béton renforcés par fibres	26
I.4 Conclusion	29

CHAPITRE II : RHÉOLOGIE DU BÉTON RENFORCÉ PAR DES FIBRES

II.1	Ouvrabilité du béton renforcé par fibres métalliques	30
II.1.1	Introduction	30
II.1.2	Formulation, Fabrication, et Mise en œuvre	30
II.1.2.1	Formulation du béton de fibres métalliques	30
II.1.2.1.1	Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par SERNA.ROS	32
II.1.2.1.2	Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par P. ROSSI	32
II.1.2.2	Fabrication de béton renforcé de fibres métalliques	33
II.1.2.3	La mise en œuvre du béton renforcé de fibres métalliques	34
II.1.2.3.1	Technique de mise en œuvre du béton de fibres	35
II.1.3	Les méthodes de mesure de l'ouvrabilité du BFM	35
II.1.3.1	Effet des agrégats et les fibres d'acier sur l'ouvrabilité	37
II.1.3.2	Notion de pourcentage critique des fibres liées à la maniabilité	40
II.1.4	Modification du squelette granulaire d'un BFM par rapport à un béton sans fibres ...	41
II.1.5	Conclusion	43

CHAPITRE III : VALORISATION DU SABLE DE DUNE EN GÉNIE CIVIL

III.1	Introduction	44
III.2	Intérêt de sable de dune	44
III.2.1	Les aspects économiques	44
III.2.2	Les aspects techniques	44
III.3	Valorisation de sable de dune dans la formulation du béton	44
III.3.1	En Union Soviétique	44
III.3.2	En France	45
III.3.3	En Algérie	46
III.4	Domaines d'utilisation des bétons de sable	49
III.4.1	En raison de sa fluidité	49
III.4.2	En raison de sa faible tendance à la ségrégation	49
III.5	Conclusion	50

PARTIE 02 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE
**CHAPITRE IV : CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUES
DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET LEURS ESSAIS**

IV.1	Introduction	51
IV.2	Gravier	51
IV.2.1	Masses volumiques	52
IV.2.1.1	Masse volumique apparente	52
IV.2.1.2	Masse spécifique	52
IV.2.2	Capacité d'absorption d'eau du gravier	53
IV.2.3	Propreté superficielle du gravier	53
IV.2.4	Propriété mécanique	54
IV.2.4.1	Los Angeles	54
IV.2.5	Analyse granulométrique du gravier	54
IV.3	Sable	56
IV.3.1	Masses volumiques	57
IV.3.2	Analyse chimique	57
IV.3.3	Observation à grande échelle des deux sables.....	58
IV.3.4	Capacité d'absorption d'eau du sable	58
IV.3.5	Essai d'équivalent de sable	59
IV.3.6	Analyse granulométrique	59
IV.3.6.1	Module de finesse	59
IV.3.7	Correction du sable de dune	62
IV.4	Ciment	65
IV.4.1	Composition	65
IV.4.2	Analyses et caractérisation	66
IV.4.2.1	Consistance normale	66
IV.4.2.2	La finesse de mouture (finesse de Blaine)	66
IV.4.2.3	Masse volumique absolue	67
IV.4.2.4	Essai de prise	67
IV.4.2.5	Essai mécanique	67
IV.5	Eau de gâchage	68
IV.6	Adjuvant	68
IV.7	Fibres	69
IV.7.1	Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres	70
IV.8	Acier d'armature	70
IV.9	Conclusion	71

**CHAPITRE V : ÉTUDE DU BÉTON A BASE DE SABLE DE DUNE
CORRIGÉ RENFORCÉ PAR DES FIBRES MÉTALLIQUES**

A) Optimisation du béton par principe de leur maniabilité et étude de ces propriétés	
mécaniques	72
V.1 Introduction	72
V.2 Méthodologie expérimentale	72
V.3 Composition des bétons étudiés	72
V.3.1 Pré-formulation selon la Méthode de DREUX-GORISSE	73
V.3.1.1 Le dosage en ciment et en eau	73
V.3.1.2 Les proportions volumétriques des classes granulaires	74
V.3.1.3 Évaluation des proportions pondérales des composants de béton	76
V.3.2 Méthode de BARON-LESAGE	77
V.3.2.1 Détermination du squelette optimal du béton	77
V.3.2.2 Le choix de l'optimisation expérimentale du béton de fibres	78
V.3.3 Notation des mélanges	79
V.3.4 Recherche du dosage du super plastifiant qui donne la maniabilité souhaité	79
V.3.5 Les compositions de différents types du béton étudié	80
V.4 Préparation du béton	81
V.4.1 Préparation du béton ordinaire (sans fibres)	81
V.4.2 Préparation du béton avec fibres	81
V.4.3 Confections des éprouvettes et conditions de conservation	82
V.5 Procédures des essais	82
V.5.1 Essai sur béton	82
V.5.1.1 Essais réalisés à l'état frais	82
V.5.1.2 Essai sur le béton durci	83
V.5.2 Essais réalisés à l'état frais	85
V.5.2.1 Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS	85
V.5.2.2 Masse volumique du béton frais	85
V.5.3 Essais sur le béton durci	86
V.5.3.1 Détermination de la masse volumique	86
V.5.3.2 Résistance à la compression	86
V.5.3.3 Résistance à la flexion (flexion 3 points)	87
V.5.3.4 Etude de variation dimensionnelle du béton de fibres	88
V.5.3.4.1 Retrait de séchage	88
V.5.3.4.2 Retrait endogène	88
V.5.3.4.3 Principe de mesure des retraits	89
V.5.3.4.3.4 Perte en poids	89

V.5.3.5	Essais de durabilité	90
V.5.3.5.1	Introduction	90
V.5.3.5.2	Essais mouillage-séchage	90
V.5.3.5.3	Essais gel-dégel	91
V.5.3.5.4	Essais d'absorption d'eau	92
V.5.3.5.4.1	Essais d'absorption d'eau par immersion	92
V.5.3.5.4.2	Essais d'absorption d'eau par capillarité	93
V.5.3.6	Essais d'auscultations dynamiques	93
V.5.3.6.1	Module d'élasticité dynamique	94
V.5.3.6.2	Résistance à la compression	95
V.5.3.7	Étude du comportement de flexion sur des poutres armées contenant des fibres d'acier	95
B)	Analyses et discussions des résultats	99
V.6	Essais réalisés à l'état frais	99
V.6.1	Masse volumique du béton frais	99
V.6.2	Consistance du béton	100
V.7	Essais sur le béton durci	100
V.7.1	Masse volumique du béton durci	100
V.7.2	Effet des fibres sur la résistance à la compression	101
V.7.3	Effet des fibres sur la résistance à la flexion	106
V.7.4	Etude de variation dimensionnelle	110
V.7.4.1	Retrait de séchage	110
V.7.4.2	Retrait endogène	112
V.7.4.3	Perte en poids	116
V.7.5	Essais de durabilité	118
V.7.5.1	Essais mouillage-séchage	118
V.7.5.2	Essais gel-dégel	120
V.7.5.3	Essais d'absorption d'eau par immersion	121
V.7.5.4	Essais d'absorption d'eau par capillarité	123
V.7.6	Essais d'auscultations dynamiques	125
V.7.6.1	Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques	125
V.7.6.2	Module d'élasticité dynamique E_d	126
V.7.6.3	Résistance à la compression	127
V.7.7	Résultats du comportement de flexion sur des poutres armées	128
V.7.7.1	Flèche et ouverture de fissure des poutres	128
V.7.7.2	Effort tranchant et moment fléchissant avec le mode de rupture	138
V.8	Conclusion	140
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS		142
Références bibliographiques		

RÉSUMÉS

Résumé

L'objectif principal de cette étude est la valorisation des matériaux locaux (sable de dune) région de Laghouat, et l'exploitation d'un sous produit, copeaux d'acier issues du fils d'attache dans le but de leur utilisation dans la composition du béton de structure d'une part, et d'autre part l'effet de ces fibres métalliques sur (la résistance mécanique, le retrait, la durabilité dans l'eau, la vitesse des ondes ultrasoniques, le comportement en flexion sur des poutres armées). Deux modèles de fibres ont été utilisées : copeaux d'acier courts (20mm) et copeaux d'acier longs (50mm).

Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'amélioration aussi bien des résistances mécaniques du béton surtout à la traction par flexion. Les résultats montrent aussi que le retrait du béton est diminué par la présence des fibres ; de plus celles-ci modifient la cinétique de séchage. Une évidence de couplage entre le retrait et la perte en poids, avec l'essai de la capacité d'absorption a été soulevée. Ainsi l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

A partir de résultats obtenus on peut utiliser ce type du béton pour la fabrication des éléments structuraux avec toute fiabilité et sécurité surtout dans les domaines où des sollicitations excessives peuvent exister. Ces observations sont susceptibles d'élargir le champ des applications de ces matériaux renforcés par les fibres métalliques.

Mots clés : béton, sable de dune, fibres métalliques, formulation, résistance mécaniques, retrait, durabilité, vitesse des ondes ultrasoniques, comportement de flexion des poutres.

Abstract

The main objective of this study is the valorization of local materials (sand dune) in region Laghouat, and exploitation of a by-product, steel chips from the attachment wire in order to use in the composition of the concrete of structure on the one hand, and secondly to study the effect of metal fibers on it (mechanical strength, shrinkage, durability to water, the velocity of ultrasonic waves, behavior bending forces on beams). Two models of fibers were used: steel chips short (20mm) and steel chips long (50mm).

The results of this study showed improvement of both mechanical strength of the concrete especially the tensile bending. The results also show that the shrinkage of concrete is decreased by the presence of fibers, most of them affect the drying kinetics. Obvious coupling between shrinkage and water loss, with the test the absorption capacity has been raised. Thus the introduction of the fibers in the concrete resulting in a more or less pronounced increase of volume of voids, associated with a decrease of the compactness of the material.

From results we can use this type of concrete for the manufacture of structural elements with safe reliable especially in areas where excessive stress may exist. These observations are likely to broaden the applications of these materials reinforced with metal fibers.

Keys words : concrete, sand dune, metal fibers, formulation, mechanical strength, shrinkage, durability, speed of ultrasonic waves, bending behavior of the beams.

المخلص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقيم المواد المحلية (رمل الكثبان) لمنطقة الأغواط، و استغلال بقايا أسلاك الربط الحديدية لغرض استعمالها في تكوين خرسانة البناءات من جهة، و من جهة أخرى دراسة مدى تأثير هذه الألياف على (المقاومة الميكانيكية، الانكماش، الديمومة، سرعة الأمواج فوق الصوتية، سلوك الانحناء على روافد من الخرسانة المسلحة). تم استعمال نموذجين من الألياف : ألياف حديدية قصيرة بطول (20 مم)، ألياف حديدية طويلة بطول (50 مم).

نتائج هذه الدراسة أظهرت أن هناك تحسين في المقاومة الميكانيكية خاصة مقاومة الشد بالانحناء، كذلك هناك نقص في الانكماش بزيادة الألياف المعدنية. إضافة إلى تغيير حركية التجفيف و الذي نوضحه بالترابط بين الانكماش و فقدان الوزن، كما نتج عن إضافة هذه الألياف فراغات بداخل الخرسانة مما أدى إلى نقص في التراصية لهذه المادة.

من خلال النتائج المتحصل عليها، يمكن أن نستعمل هذا النوع من الخرسانة في إنشاء عناصر البنية بكل أمان و سلامة خاصة في الأماكن التي يمكن أن تتواجد فيها قوى زائدة مؤثرة. هذه الملاحظات قد تكون الأرجح لتوسيع نطاق تطبيق هذه المواد المقواة بالألياف المعدنية.

الكلمات المفتاحية : خرسانة، رمل الكثبان، ألياف معدنية، تشكيل، مقاومة ميكانيكية، انكماش، ديمومة، سرعة الأمواج فوق الصوتية، سلوك الانحناء للروافد.

Liste des figures

Figure (I-1)	: Différente forme des fibres d'acier	02
Figure (I-2)	: Courbes effort/déformation et examen des ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques	05
Figure (I-3)	: Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement	06
Figure (I-4)	: Variation de la viscosité plastique avec le pourcentage des fibres incorporées.....	07
Figure (I-5)	: Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en traction	08
Figure (I-6)	: Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres	09
Figure (I-7)	: Influence de l'espacement des fibres sur résistance à la fissuration du béton.....	11
Figure (I-9)	: Brevet de WEARKLY et SMITH (1920)	13
Figure (I-10)	: Brevet de ETHERIDGE et al	13
Figure (I-11)	: Schématisation du comportement d'un bloc de béton soumis à une traction directe.....	15
Figure (I-12)	: Rôles des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton	15
Figure (I-13)	: Mécanisme de corrosion des fibres en présence de fissure, et sans pénétration des chlorures	17
Figure (I-14)	: Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres	17
Figure (I-15)	: Influence du % des fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres	18
Figure (I-16)	: Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres	19
Figure (I-17)	: Contribution des fibres dans le comportement à la traction	20
Figure (I-18)	: Variation de la résistance à la flexion en fonction du % en masse des fibres.....	21
Figure (I-19)	: Influence du % de fibres sur la résistance à la flexion	21
Figure (I-20)	: Courbes charges – flèches	22
Figure (I-21)	: Influence de la nature et la quantité des fibres sur le retrait à 20°C et 55% HR.....	24
Figure (I-22)	: Intérêt de béton de fibres pour différents usages	28
Figure (II-1)	: Abaque de formulation du béton de fibres	31
Figure (II-2)	: Détermination du rapport S/G optimal d'après SERNA .ROS	32
Figure (II-3)	: Détermination du rapport S/G optimal d'après P.ROSSI	33
Figure (II-4)	: Limites technologiques pour la mise en œuvre du béton de fibres d'acier	35
Figure (II-5)	: Variation du temps au cône inversé en fonction du temps Vé-Bé pour les Fibres d'acier	36
Figure (II-6)	: Maniabilimètre LCL : schéma de principe	37
Figure (II-7)	: Encadrement des granulats par les fibres métalliques	38
Figure (II-8)	: Teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats [Swamy et Mangat]	38
Figure (II-9)	: Relation entre le temps d'écoulement et le teneur en fibre (%)	39
Figure (II-11)	: Exemple de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur le rapport S/G du BFM	42
Figure (II-12)	: Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM comparé à celui d'un béton non fibré	43

Figure (II-1)	: Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 350 Kg/m ³	47
Figure (III-2)	: Résistance à la flexion de béton de sable fibré en fonction du % de sable et en fonction du temps	49
Figure (IV-1)	: Courbe granulométrique du gravier G8/15	55
Figure (IV-2)	: Courbe granulométrique du gravier G3/8	56
Figure (IV-3)	: Analyse chimique des deux sables	57
Figure (IV-4)	: Observations des grains de sable au MEB	58
Figure (IV-5)	: Essai Equivalant de sable	59
Figure (IV-6)	: Analyse granulométrique du sable de dune SD	60
Figure (IV-7)	: Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA	61
Figure (IV-8)	: Fuseaux préférentiel du béton	62
Figure (IV-9)	: Analyse granulométrique du sable corrigé SC	64
Figure (IV-10)	: Courbes granulométriques des différents sables	64
Figure (V-1)	: Courbe granulométrique de référence	75
Figure (V-2)	: Optimisation du mélange du béton ordinaire (sans fibres)	78
Figure (V-3)	: Variation de l’Affaissement en fonction du % de super plastifiant (SP)	80
Figure (V-5)	: Organigramme représentatif des différents essais effectués	84
Figure (V-6)	: Mesure de la consistance	85
Figure (V-7)	: Schématisation du dispositif de compression	86
Figure (V-8)	: Schématisation du dispositif de flexion 3 points	88
Figure (V-9)	: Essai de Retrait (Rétractomètre)	89
Figure (V-10)	: Dispositif expérimental de l’essai d’absorption capillaire	93
Figure (V-11)	: Appareil d’Auscultation dynamique (ultra sonore)	94
Figure (V-12)	: Schéma statique de chargement	96
Figure (V-13)	: Ferrailage adopté pour les poutres	97
Figure (V-14)	: Variation de la masse volumique pour différents types du béton à l’état frais.....	99
Figure (V-15)	: Variation de la masse volumique pour différents types du béton à l’état durci.....	100
Figure (V-16)	: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés à l’air libre (ENVII)	102
Figure (V-17)	: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés à l’air libre (ENVII)	102
Figure (V-18)	: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés sous l’eau (ENVI)	103
Figure (V-19)	: Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés sous l’eau (ENVI)	104
Figure (V-20)	: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés à l’air libre (ENVII)	106
Figure (V-21)	: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés à l’air libre (ENVII)	106
Figure (V-22)	: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés sous l’eau (ENVI)	107
Figure (V-23)	: Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés sous l’eau (ENVI)	107

Figure (V-24)	: Evolution de retrait de séchage des bétons (BO, BFC1 et BFC2) en fonction du temps..	111
Figure (V-25)	: Evolution de retrait de séchage des bétons (BO, BFL1 et BFL2) en fonction du temps..	111
Figure (V-26)	: Evolution de retrait endogène des bétons (BO, BFC1 et BFC2) en fonction du temps...	113
Figure (V-27)	: Evolution de retrait endogène des bétons (BO, BFL1 et BFL2) en fonction du temps...	113
Figure (V-28)	: Influence de la longueur et de pourcentage de fibres métalliques sur le retrait de séchage à 90 jours	114
Figure (V-29)	: Variation de la perte en poids de différents types du béton en (%)	116
Figure (V-30)	: Variation du retrait séchage en fonction de la perte en poids pour différents types de béton	117
Figure (V-31)	: Influence du mouillage-séchage sur la résistance à la compression pour différents types de béton	118
Figure (V-32)	: Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression pour différents types de béton	120
Figure (V-33)	: Evolution de coefficient d'absorption pour différents types de béton	122
Figure (V-34)	: Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différents types de béton	123
Figure (V-35)	: Evolution de la vitesse de propagation du son en fonction du temps pour différents types du béton	125
Figure (V-36)	: Evolution du module d'élasticité dynamique E_d en fonction du temps pour différents types du béton	126
Figure (V-37)	: Variation de résistance à la compression en fonction de l'âge d'essai pour différents types des bétons	127
Figure (V-38)	: Destruction et fissuration finale de la poutre PBO avec A_t	129
Figure (V-39)	: Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre témoin PBO avec A_t	129
Figure (V-40)	: Destruction et fissuration finale de la poutre PBFC2 sans A_t	130
Figure (V-41)	: Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 sans A_t	130
Figure (V-42)	: Destruction et fissuration finale de la poutre PBFL2 sans A_t	131
Figure (V-43)	: Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFL2 sans A_t	131
Figure (V-44)	: Destruction et fissuration finale de la poutre PBFC2 avec A_t	133
Figure (V-45)	: Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 avec A_t	133
Figure (V-46)	: Destruction et fissuration finale de la poutre PBFL2 avec A_t	134
Figure (V-47)	: Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFL2 avec A_t	135
Figure (V-48)	: Courbes force - flèche à mi-travée pour différents types de poutres	136
Figure (V-49)	: Courbes force - ouverture de la fissure pour différents types de poutres	136
Figure (V-50)	: Diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant d'une poutre soumise à la flexion 4 points	138

Liste des tableaux

Tableau (I-1)	: Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées	04
Tableau (I-2)	: Facteurs influents sur la durabilité	25
Tableau (I-3)	: Illustre quelques applications de bétons renforcés de fibres et leurs intérêts	27
Tableau (III-1)	: Résultats des essais	45
Tableau (III-2)	: Composition et résultats de caractéristiques importantes sur des éprouvettes (16x32) du béton de sable de dune	46
Tableau (III-3)	: Composition de béton étudiée	47
Tableau (III-4)	: Les résultats de résistance à 28 jours	48
Tableau (III-5)	: Les résultats de résistance à 28 jours	48
Tableau (IV-1)	: Masses volumiques apparentes et spécifiques des graviers utilisées	52
Tableau (IV-2)	: Coefficient d'absorption d'eau des graviers utilisés	53
Tableau (IV-3)	: Propreté superficielle du gravier	53
Tableau (IV-4)	: Coefficient de Los Angeles des graviers utilisés	54
Tableau (IV-5)	: Analyse granulométrique par tamisage de gravier G8/15	55
Tableau (IV-6)	: Analyse granulométrique par tamisage de gravier G3/8	56
Tableau (IV-7)	: Masses volumiques apparentes et spécifiques des sables utilisés	57
Tableau (IV-8)	: Coefficient d'absorption d'eau des sables utilisés	58
Tableau (IV-9)	: Equivalent de sable utilisé	59
Tableau (IV-10)	: Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune SD	60
Tableau (IV-11)	: Analyse granulométrique par tamisage du sable alluvionnaire SA	61
Tableau (IV-12)	: Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé SC	63
Tableau (IV-13)	: Analyses chimiques de ciment	66
Tableau (IV-14)	: Propriétés physiques et mécaniques du ciment	68
Tableau (IV-15)	: Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW 30	69
Tableau (IV-16)	: Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées	70
Tableau (V-1)	: Composition préliminaire selon la méthode de DREUX-GORISSE	76
Tableau (V-2)	: Variation de la maniabilité du béton, en fonction de $(\frac{S}{G})$ pour différentes compositions (kg/m ³)	78
Tableau (V-3)	: Notation des mélanges	79
Tableau (V-4)	: L'Affaissement en fonction du pourcentage de super plastifiant (SP)	79
Tableau (V-6)	: Composition en (kg/m ³) des bétons de fibres et du béton ordinaire	81
Tableau (V-7)	: Nomenclature des différentes poutres destinées à la flexion 4 points	96
Tableau (V-8)	: Les valeurs moyennes de résistances mécaniques à 28 jours	97
Tableau (V-9)	: Résultats de la masse volumique de béton frais pour différents type du béton.....	99
Tableau (V-10)	: Résultats de la consistance pour différents types du béton	100
Tableau (V-11)	: Résultats de la masse volumique de béton durci pour différents type du béton.....	100

Tableau (V-12)	: Résistance à la compression pour différents bétons conservés à l'air libre (ENVII)..	101
Tableau (V-13)	: Résistance à la compression pour différents bétons conservés sous l'eau (ENVI)....	103
Tableau (V-14)	: Résistance à la flexion pour différents bétons conservés à l'air libre (ENVII).....	106
Tableau (V-15)	: Résistance à la flexion pour différents bétons conservés sous l'eau (ENVI).....	107
Tableau (V-16)	: Résultats du retrait de séchage pour différents types de béton en ($\mu\text{m}/\text{m}$)	110
Tableau (V-17)	: Résultats du retrait endogène pour différents types de béton en ($\mu\text{m}/\text{m}$)	112
Tableau (V-18)	: Résultats de la perte en poids pour différents types du béton en (%)	116
Tableau (V-19)	: Influence du mouillage-séchage sur la résistance à la compression à 28 jours.....	118
Tableau (V-20)	: La variation des masses après l'essai mouillage-séchage	119
Tableau (V-21)	: Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression pour différents types du béton	120
Tableau (V-22)	: La variation des masses après l'essai gel-dégel	121
Tableau (V-23)	: Résultats de coefficient d'absorption A_b pour différents types de béton	121
Tableau (V-24)	: Résultats de l'absorption d'eau par capillarité pour différents types des bétons en (gr/cm^2)	123
Tableau (V-25)	: Résultats d'essai d'auscultation dynamique pour différents types de béton	125
Tableau (V-26)	: Résultats de la flèche et ouverture de fissure pour les différents types de poutre...	128
Tableau (V-27)	: Différentes phases de comportement en flexion des poutres étudié et le gain de capacité portante	132
Tableau (V-28)	: Taux de diminution de la flèche pour un chargement de 44 KN	137
Tableau (V-29)	: Résultats de l'effort tranchant et le moment fléchissant avec le mode de rupture observé pour les différents types de poutres	138

Liste des photos

Photo (IV-1)	: Les fibres utilisées	70
Photo (V-1)	: Destruction finale des éprouvettes (10x10x10) cm ³ par la compression	105
Photo (V-2)	: Destruction finale des éprouvettes (7x7x28) cm ³ par la flexion	109

Abréviations

BSF	: Matrice témoin sans fibres.
BFI50	: Matrice renforcée avec des fibres commercialisées (FI50).
BSP50	: Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP50).
BSP25	: Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP25).
MT	: Mortier témoin.
MF10	: Mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles.
MF20	: Mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles.
MC10	: Mortier renforcé de 1 % copeaux d'acier.
MC20	: Mortier renforcé de 2 % copeaux d'acier.
BO	: Béton ordinaire.
BFC1	: Béton de fibres courtes (20 mm) contient de 0,5 % de fibres métalliques.
BFC2	: Béton de fibres courtes (20 mm) contient de 1,0 % de fibres métalliques.
BFL1	: Béton de fibres longues (50 mm) contient de 0,5 % de fibres métalliques.
BFL2	: Béton de fibres longues (50 mm) contient de 1,0 % de fibres métalliques.
M	: Masse totale du béton frais.
G	: Masse du gravier (kg/m ³).
SP	: Super plastifiant.
C	: Dosage en ciment.
E	: Dosage en eau.
G	: Coefficient granulaire.
BFM	: Béton de fibres métalliques.
SD1	: Sable de dune de la région de Lichana (BISKRA).
SD2	: Sable de dune de la région de Ain Bennaoui (BISKRA).
SO	: Sable d'oued Djedaï de la région de Lioua.
SD	: Sable de dune.
SA	: Sable alluvionnaire.
SC	: Sable corrigé.
PBO avec At	: Poutre en béton ordinaire (témoin) avec Armatures transversales.
PBFC2 sans At	: Poutre en béton ; contient 1% de fibres courtes sans Armatures transversales.
PBFC2 avec At	: Poutre en béton ; contient 1% de fibres courtes avec Armatures transversales.
PBFL2 sans At	: Poutre en béton ; contient 1% de fibres longues sans Armatures transversales.
PBFL2 avec At	: Poutre en béton ; contient 1% de fibres longues avec Armatures transversales.

Liste des Symboles

R_t	: Résistance à la traction de fibres.
E	: Module d'élasticité de fibres.
R_{feu}	: Résistance au feu de fibres.
σ_{fc}	: Résistance à la fissure de composite.
σ_{ft}	: Contrainte de traction dans la fibre au moment de la fissuration de la matrice.
V_f	: Pourcentage volumique de fibres.
σ_m	: Résistance à la traction de la matrice.
σ_p	: Résistance post fissuration moyenne, en traction.
α	: Facteur d'orientation.
τu	: Contrainte de cisaillement moyenne (supposée constante) à l'interface fibre-matrice.
L/d	: Élancement de la fibre.
η	: Facteur d'adhérence.
s	: L'espace moyen.
L_c	: Longueur critique.
σ_{fu}	: Contrainte de rupture de la fibre.
d	: Diamètre de la fibre.
τ	: Contrainte d'adhérence.
σ_f	: Résistance à la flexion du béton de fibres.
σ_b	: Résistance à la flexion du béton témoin.
M_{io}	: Module de finesse du béton sans fibres.
M_{ip}	: Module de finesse du béton ayant un pourcentage en fibres p_i .
ACI	: American concrete institute.
L_f	: Longueur de fibre.
D_{max}	: Diamètre maximal des granulats.
V_{fmax}	: Volume maximal des fibres.
B	: Constante qui dépend des constituants du béton.
Φ_g	: Diamètre du plus gros granulats.
γ_{app}	: Masse volumique apparente.
M_1	: Masse de matériau.
M_2	: Masse de la mesure vide.
V	: Volume total du matériau.
γ_s	: Masse spécifique.
M	: Masse du corps.
$V_2 - V_1$: Volume absolu.
A_b	: Coefficient d'absorption d'eau.
M_s	: Masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante.
M_a	: Masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant 24h à T=20°C.
P (%)	: Propreté superficielle du gravier.
L_A (%)	: Coefficient de Los Angeles des graviers utilisés.

E_{sv}	: Équivalent de sable visuel.
E_{sp}	: Équivalent de sable à piston.
M_{f1}	: Module de finesse du sable de dune.
M_{f2}	: Module de finesse du sable alluvionnaire.
M_{f3}	: Module de finesse du sable corrigé.
S	: Surface spécifique du ciment.
K	: Constante de l'appareil.
t	: Le temps mesuré en seconde.
e	: Porosité de ciment.
φ	: La masse volumique du ciment.
η	: Viscosité de l'air à la température de l'essai.
F_c	: Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours).
F_{ce}	: Classe vraie du ciment (à 28 jours).
K	: Est un coefficient de correction fonction du dosage en ciment.
K_s	: Est un coefficient correcteur qui tient compte du module de finesse du sable.
K_p	: Est un coefficient dépend de la plasticité du béton.
γ	: Coefficient de compacité.
ρ_f	: Masse volumique de béton frais.
ρ_d	: Masse volumique de béton durci.
σ_c	: Résistance à la compression.
F	: Charge de rupture.
$S (a^2)$: Surface de compression de l'éprouvette.
M	: Moment de flexion.
σ_f	: Contrainte en flexion du béton de fibres.
$\varepsilon(t)$: La mesure de retrait à l'instant t .
λ_p^m	: La perte en résistance à la compression.
R_{c28}^i	: La résistance initiale avant l'essai mouillage-séchage.
R_{c28}^m	: La résistance finale après l'essai mouillage-séchage.
τ_g	: Le taux de perte en masse.
m_m^i	: Masse de l'éprouvette initiale sèche avant l'essai mouillage-séchage.
m_m^f	: Masse de l'éprouvette finale sèche avant l'essai mouillage-séchage.
R_{c28}^g	: La résistance finale après l'essai gel-dégel.
m_g^i	: Masse de l'éprouvette initiale sèche avant l'essai gel-dégel.
m_g^f	: Masse de l'éprouvette finale sèche avant l'essai gel-dégel.
A_b	: Le coefficient d'absorption par immersion.
CA	: Le coefficient d'absorption capillaire.
V	: Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton.
E_d	: Le module d'élasticité dynamique.
ν	: Coefficient de poisson du béton.
f_{bu}	: La valeur de calcul de la contrainte du béton.
θ	: Le coefficient θ dépend de la durée d'application des charges.
γ_b	: Le coefficient de sécurité.

- f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours.
 A_s : La section d'armature longitudinale tendue.
 b, h : La largeur et la hauteur de section transversale de la poutre.
 d : Position des armatures tendues par rapport à la fibre la plus comprimée de la section de béton.
 M_{th} : Le moment résistant théorique.
 f : Flèche mesurée.
 w : Ouverture de fissure mesurée.
 g : Le gain de capacité portante des poutres en (%)
 F_{rup} : Force à la rupture.
 V_{exp} : Effort tranchant expérimental.
 M_{exp} : Moment fléchissant expérimental.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le béton est sans aucun doute été depuis longtemps, le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de construction. C'est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau, de granulats (sable et gravier), et éventuellement d'adjuvant, le tout choisi de façon rationnelle. Ce béton subit des fissurations dont les causes sont diverses : retrait, réactions chimiques, contraintes mécaniques ou environnementales. Pour lutter contre ces fissurations, on a tendance à augmenter la section des aciers d'armatures. L'adhérence entre l'acier et le béton empêche alors les fissures de se propager.

Au cours de cette dernière décennie, l'Algérie a connu un développement rapide dans le secteur de construction, ce secteur est confronté aujourd'hui à deux exigences à priori contradictoires qui sont la réduction des coûts d'une part et l'amélioration de la qualité d'autre part. Une exploitation des ressources dont disposent les régions de l'Atlas Saharien et le Nord du Sahara s'impose, et cela par la valorisation de ces matériaux qui constituent d'énormes gisements dans ces régions. La disponibilité des matériaux locaux à savoir le sable de dunes qui couvre une grande partie du territoire (plus de 60% du territoire national) permet une exploitation et une valorisation dans le domaine de construction. Le sable joue un rôle très important dans la fabrication du béton, mais la plupart des chercheurs ont constaté que ce matériau présente quelques inconvénients tels que le grand retrait. L'expérience de la majorité des auteurs trouve que l'addition des fibres de toutes natures au béton ou au mortier conduisent à la diminution du retrait et à l'augmentation des résistances à la fissuration.

Pour cela on ajoute des fibres, qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème de la fragilité du béton et minimiser le risque de fissuration, ce qui permet d'améliorer sa durabilité et sa résistance. Il existe actuellement une grande variété de fibres. Parmi les plus utilisées, les fibres d'acier, de verre, d'amiante et de polypropylène...etc.

C'est dans ce cadre que nous allons entreprendre ce travail expérimental dont l'objectif principal est de contribuer d'une part, à la valorisation de ces matériaux locaux dans la formulation d'un béton de structure, et d'autre part dans l'étude de renforcement de ce béton par les déchets récupérés sur les chantiers « fil d'attache » comme des fibres. Cette étude est consacrée sur : le comportement mécanique, le retrait, la durabilité à l'eau, et la vitesse des ondes ultrasoniques, et le comportement de flexion quatre points sur des poutres armées.

Ce travail est structuré en deux parties :

➤ **Première partie :**

Recherches bibliographiques.

Elle composée de trois chapitres.

- Dans le premier chapitre nous présentons les différents types de fibres et leurs caractéristiques mécaniques et mécanisme du renforcement, ainsi que les propriétés mécaniques du béton de fibres.
- Dans le deuxième chapitre nous étudierons la formulation, fabrication et mise en œuvre des bétons de fibres, ainsi que les facteurs influençant sur l'ouvrabilité.
- Dans le troisième chapitre nous citerons les recherches effectuées sur l'utilisation et valorisation de sable de dune dans le domaine du Génie Civil et Travaux Publics.

➤ **Deuxième partie :**

Étude expérimentale.

Elle est composée de deux chapitres et une conclusion.

- Dans le quatrième chapitre on traitera les différentes caractéristiques physico-mécaniques des matériaux utilisés pour la confection de notre composite.
- Dans le cinquième chapitre on présentera la formulation et préparation du mélange, ainsi que les différents essais à l'état frais et durci du béton étudié. avec l'analyse et discussions de l'ensemble des résultats obtenus.
- Conclusion : elle est consacré à la validation de la performance structurale des mélanges optimisés le comportement de flexion quatre points sur des poutres armées. (Essais sur poutres).

Conclusion générale : Ce travail est suivi d'une conclusion générale qui reprendra les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent, les perspectives et recommandations au développement de ce présent travail.

PARTIE 1
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

***CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES ET LES BÉTONS
DE FIBRES***

***CHAPITRE II : RHÉOLOGIE DU BÉTON RENFORCÉ PAR DES
FIBRES***

***CHAPITRE III : VALORISATION DU SABLE DE DUNE EN
GÉNIE CIVIL***

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉ SUR LES FIBRES ET LES BÉTONS DE
FIBRES

I. Généralité sur les fibres et les bétons de fibres

I.1 Introduction

L'idée d'incorporer des fibres dans le béton pour améliorer ses caractéristiques est déjà ancienne et constitue la transposition des renforcements utilisés depuis fort longtemps dans des matériaux comme la terre, l'argile ou le plâtre, mais l'association avec le ciment, le mortier ou le béton est un procédé relativement récent.

Le brevet sur l'amiante ciment date de 1902, les premiers emplois de fibres d'acier interviennent en 1923. Les fibres de verre, bien que connues depuis le début du siècle, n'ont fait l'objet d'essais d'incorporation au béton qu'à partir de 1950.

Aujourd'hui, le renforcement du mortier ou du béton par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites, dont les applications sont très variées.

Les composites " ciments fibres " et " béton fibres " sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation...etc [1].

I.2 Les fibres

Le terme " Fibre " se rapporte à un corps solide flexible, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre de quelques millimètres dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle.

Les fibres se trouvent sous diverses formes différentes soit par la nature (métalliques, minérales, végétales et synthétiques) soit par les dimensions (macro ou micro-fibres), soit par la forme (droites, ondulées, crochetées aux extrémités...etc.) et bien évidemment par leurs propriétés mécaniques.

I.2.1 Les différents types des fibres utilisées et leurs caractéristiques mécaniques

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles.

I.2.1.1 Les fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et matrice.

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opérations.

La figure I-1 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton.

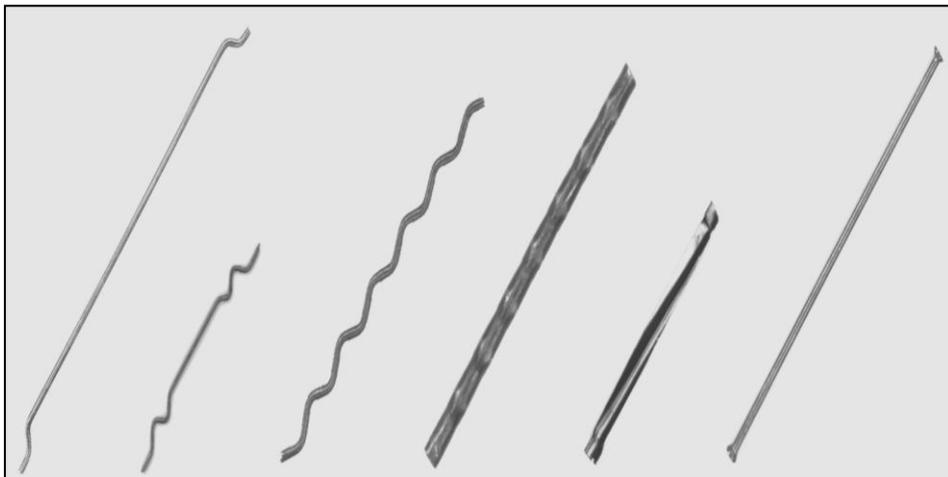


Figure (I-1) : Différente forme des fibres d'acier [2].

I.2.1.2 Les fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine, verre...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles.

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire). La fibre de verre obtenue par étirage ou soufflage de verre fondu en filaments.

I.2.1.3 Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des matériaux de type organique, elles sont apparues sur le marché du Génie Civil il y a une dizaine d'année. Avant, on les utilisait comme isolant thermique et acoustique. Progressivement, on les a introduites dans les bétons fibrés pour améliorer leur résistance à la fissuration due au retrait plastique et pour améliorer leur résistance à la compression.

Les fibres végétales sont aujourd'hui très utilisées par la filière textile et automobile. Cependant on note que malgré les avantages économiques et écologiques qu'elles présentent, leur introduction dans le bâtiment demeure timide notamment en France contrairement à d'autres pays comme le Japon et le Canada. Parmi les fibres végétales les plus utilisées on cite le chanvre, la paille, le sisal, le coco, le jonc de mer, le lin, le bambou, ... [3].

I.2.1.4 Les fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques et sont le résultat de recherches et des développements de l'industrie pétrochimique et du textile. Les fibres reconnues comme les plus résistantes sont : les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone.

Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton. Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est d'environ 160°C. Les fibres synthétiques en deux catégories selon leur dimension : les microfibres et les macrofibres synthétiques [4].

Tableau (I-1) : Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [5].

Fibres	Diamètre (µm)	Long (mm)	densité	Rt (Mpa)	E (10 ³ Mpa)	Allongement à La rupture en%	Coeff. De Dilatation (µ / m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5-500	20-80	7,8	1000 - 3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 x 2600 de section	50-60	7,8	2500	140	1		1500
Verre	5-20	40-70	2,6	1500 - 3000	80	2-3,5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0,9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyester			1,4	700-850	8	11-13		
Amiante	0,02-20	5	2,5-3,4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5-9	Variable	1,7 – 2	2000 - 3000	250-400	0,5-1,5		400 -1500
sisal	10-50	1,50	1,5		130	3		

I.2.2 Choix et rôles des fibres dans le béton

I.2.2.1 Choix des fibres

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces massives, renforcement de pâte pure de matériau de béton, réparation de structures ...), de leurs propriétés (résistance et module plus ou moins élevés, adhérence plus ou moins bonne...) de leur disponibilité et de leur prix.

Actuellement plusieurs natures de fibres sont utilisées, les qualités indispensables qu'elles doivent présenter sont les suivantes [6] :

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

I.2.2.3 Rôles des fibres dans le béton

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité.

Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes ;
- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.

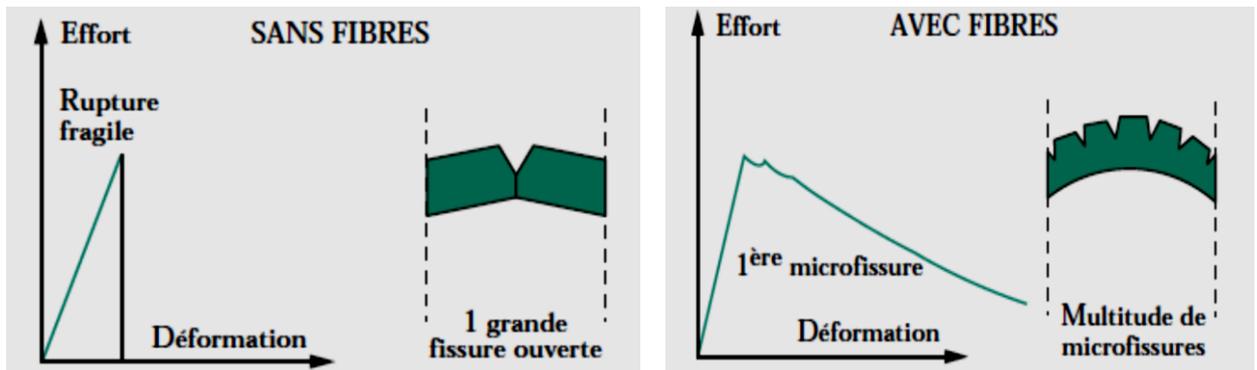


Figure (I-2) : Courbes effort/déformation et examens de ruptures en flexion dans un béton sans fibres et dans un béton avec fibres métalliques [7].

Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration ;
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur) ;
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [8].

I.2.3 Effet du dosage et de l'orientation des fibres d'acier dans le béton

I.2.3.1 Influence du dosage en fibres

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation préférentielle.

La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élancement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.

La figure I-3 tirée de l'étude de [9], donne la variation de l'affaissement du cône d'Abrams en fonction de la teneur en fibres de polypropylène et d'acier.

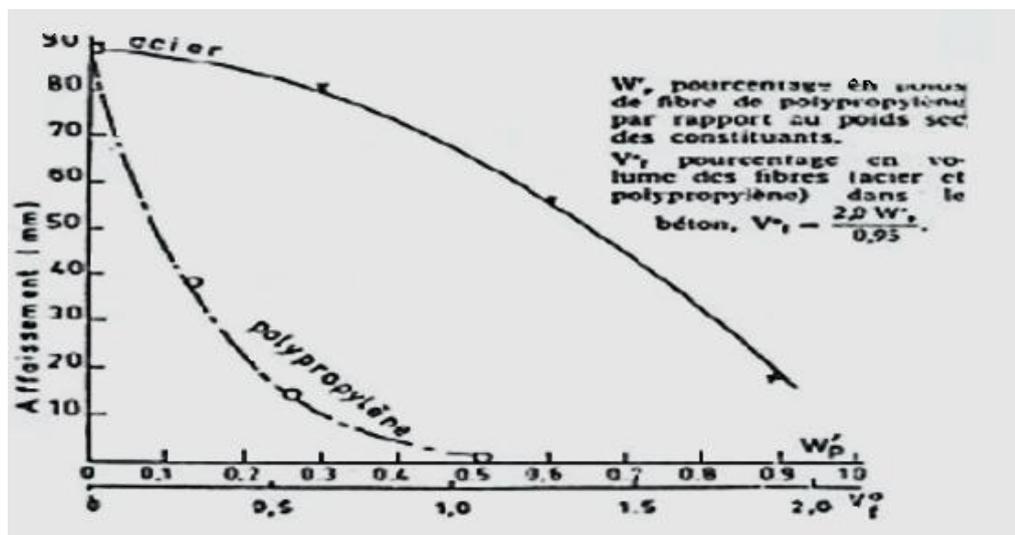


Figure (I-3) : Effet des fibres incorporées dans un béton sur son affaissement [9].

D'après les travaux de BOURAS et al [10], on peut conclure plus le pourcentage de fibres incorporées est important, plus la viscosité plastique est importante figure I-4. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 2,5 %, la viscosité plastique augmente avec une pente très faible. Au-delà de ce pourcentage, cette dernière devient nettement plus grande, ce qui justifie la consistance élevée du milieu. Cela veut dire qu'au-delà de cette valeur de concentration de fibres métalliques, il n'y a plus d'écoulement du béton frais.

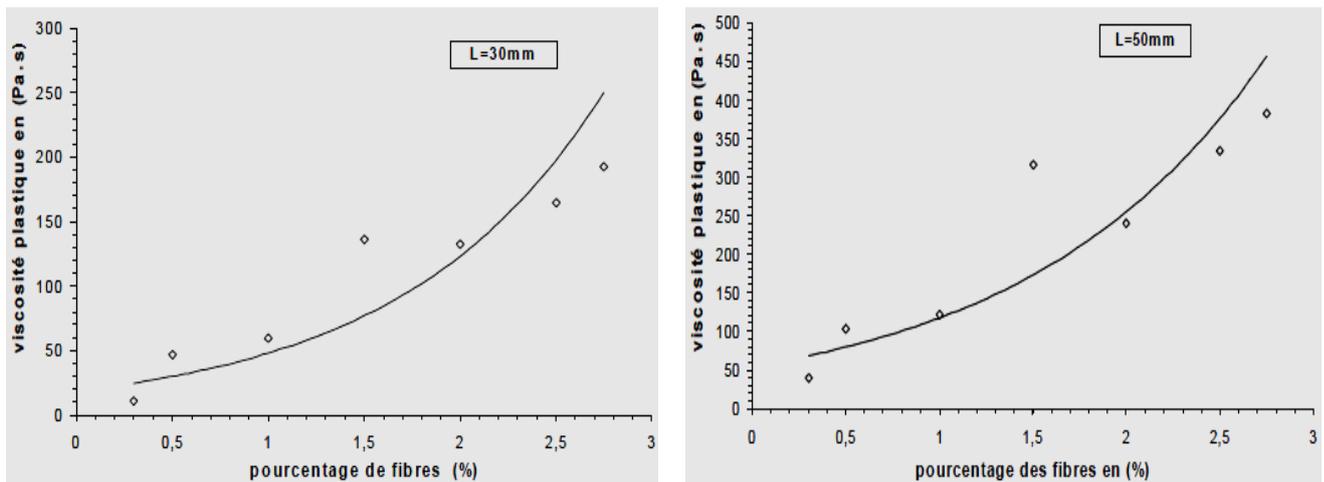


Figure (I-4) : Variation de la viscosité plastique avec le pourcentage des fibres incorporées [10].

I.2.3.2 Effet de l'orientation et de la distribution des fibres

Les propriétés du béton de fibres dépendent beaucoup de l'orientation et de la distribution des fibres par rapport aux directions de sollicitation qui peuvent être triaxiales, biaxiales, ou uniaxiale. On parle d'orientation préférentielle des fibres lorsque qu'une quantité de fibres est orientée dans une même direction. Cet effet est généralement dû à la mise en place du béton dans son moule, les fibres s'orientant parallèlement à l'axe d'écoulement [11].

La vibration du béton peut aussi conduire à la ségrégation et à une orientation préférentielle des fibres en fonction des axes de vibration qui, sous l'effet de leur poids propre, vont avoir tendance à descendre dans le fond du moule. L'utilisation de l'aiguille vibrante, peut conduire à des effets de cheminée. Lorsque l'on retire l'aiguille, le béton s'écoule afin de se remettre en place mais les fibres ne suivent pas. Ceci créé des zones sans fibres dans le béton.

CASANOVA [12], a réalisé des carottes prélevées sur une poutre en T selon trois directions : parallèlement, perpendiculairement et inclinées à 45° sur l'axe de la poutre. Il a ensuite effectué des essais de traction uniaxiale sur ces carottes.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure I-5.

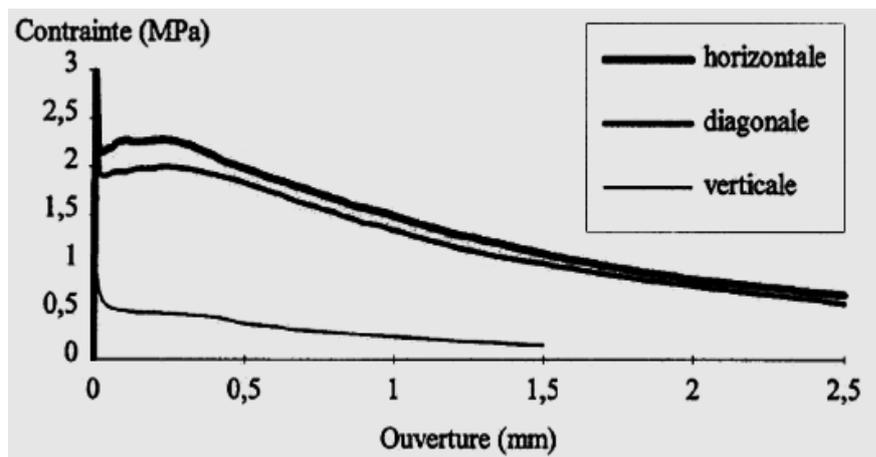


Figure (I-5) : Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en traction [12].

I.2.4 Mécanisme du renforcement par les fibres d'acier

Le mécanisme de renforcement du béton par des fibres consiste à répartir régulièrement des fibres assez courtes dans la matrice du béton. Ce réseau de fibres va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure ; la ou les premières fibres rencontrées effectuent une couture de la fissure jusqu'à bloquer l'évolution ; si les efforts excessifs persistent, d'autres fissures vont se former, qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Le renforcement par les fibres du béton permet donc de freiner la propagation incontrôlée des fissures, ce qui permet à celui-ci d'acquérir qualités (ténacité, résilience) ou d'améliorer certaines caractéristiques [13].

1.2.4.1 Fonctionnement d'une fibre dans le béton

Les fibres dans une matrice cimentaire ont un rôle analogue à celui des armatures dans le béton, c'est-à-dire reprendre les efforts de traction. Les fibres (macro ou micro) limitent la déformation, la propagation et la coalescence des microfissures au sein de la matrice cimentaire.

Les fibres cousent à la fois les fissures existantes en empêchant leur développement et limitent la formation d'autres fissures en renforçant la matrice cimentaire.

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement et ponts de matière. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% sur la figure I-6 [14].

Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui conférant une capacité portante post-fissuration.

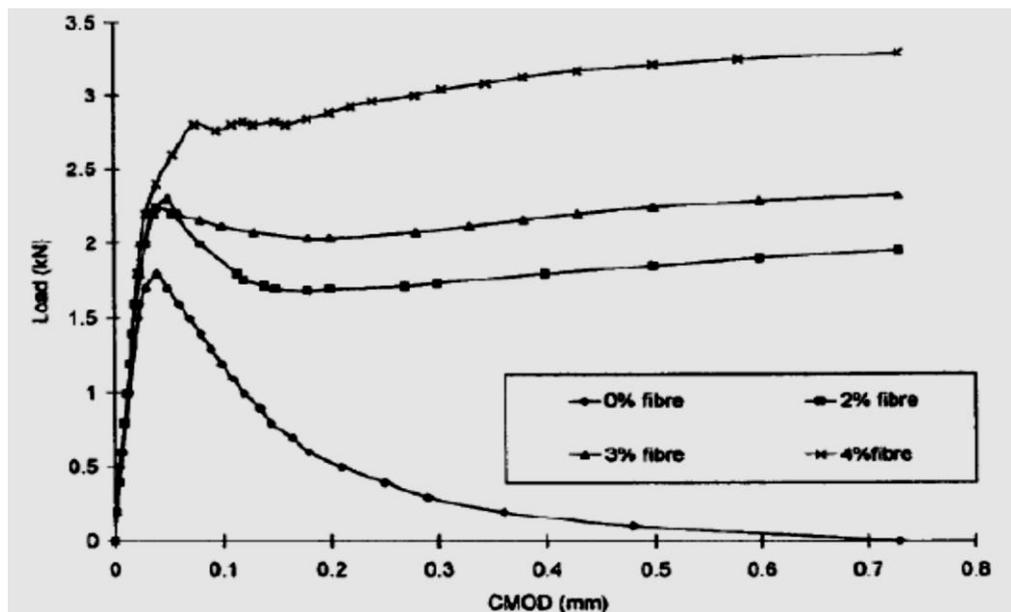


Figure (I-6) : Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [14].

1.2.4.2 Approche par le modèle composite

L'approche par la théorie des matériaux composites fut la première utilisée pour quantifier l'action des fibres sur la résistance du matériau. Elle est obtenue, dans sa plus simple expression, en utilisant la loi des mélanges [15] :

$$\sigma_{fc} = \sigma_f \cdot V_{ft} + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (\text{I.1})$$

Avec :

σ_{fc} : Résistance à la fissure de composite ;

σ_{ft} : Contrainte de traction dans la fibre au moment de la fissuration de la matrice ;

V_f : Pourcentage volumique de fibres ;

σ_m : Résistance à la traction de la matrice.

Elle traduit, dans le cas d'une matrice fragile de résistance inférieure à celle des fibres, l'apport d'un pourcentage volumique de fibres alignées dans la direction de la sollicitation.

Le rapport L/d (élancement de la fibre) et l'adhérence fibre - matrice. Cet élancement, paramètre qui a déjà été signalé pour son influence sur la maniabilité, est relié à la surface spécifique de la fibre et donc à sa capacité à mobiliser un frottement au sein de la matrice. Ces paramètres ont été repris pour évaluer la résistance post fissuration moyenne, en traction [12] :

$$\sigma_p = \alpha \cdot \tau_u \cdot \frac{L}{d} \cdot V_f \cdot \eta \quad (\text{I.2})$$

Avec :

α : Facteur d'orientation ;

τ_u : Contrainte de cisaillement moyenne (supposée constante) à l'interface fibre-matrice ;

$\frac{L}{d}$: Élancement de la fibre ;

η : Facteur d'adhérence (0,5 fibre droite, 0,75 fibre déformée, 1 fibre indentée).

Cette équation ne fournit pas d'information sur les ouvertures atteintes.

Dans un article critique des approches de type matériaux composites, SOROUSHIAN [16], montre que les macrofibres ne sont mobilisées que pour des déplacements importants (de l'ordre de 30 μm) correspondants à une macrofissuration de la matrice.

I.2.4.3 Mécanisme d'arrêt de la fissuration

Ce concept est appelé " concept d'espacement moyen " qui peut se définir d'un point de vue physique de la façon suivante : Un composite contenant un volume V_f de fibres dispersées uniformément dans le béton et orientées au hasard, est censé se comporter vis-à-vis d'un effort uniaxial comme un composite à distribution uniaxiale de même diamètre, espacées de " S " et orientées dans le sens de l'effort de traction :

$$S = 13,8 \cdot \sqrt{\frac{1}{p \cdot V_f}} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

V_f : Le pourcentage de fibre en volume sur le volume total ;

S : L'espacement moyen.

SHAH et al [17], analysent expérimentalement l'influence de l'espacement des fibres à partir des essais de traction sur le mortier. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure I-7. Ces résultats montrent un accroissement de la résistance de traction de l'ordre de 25 % en comparaison avec celui donné par ROMUALDI.

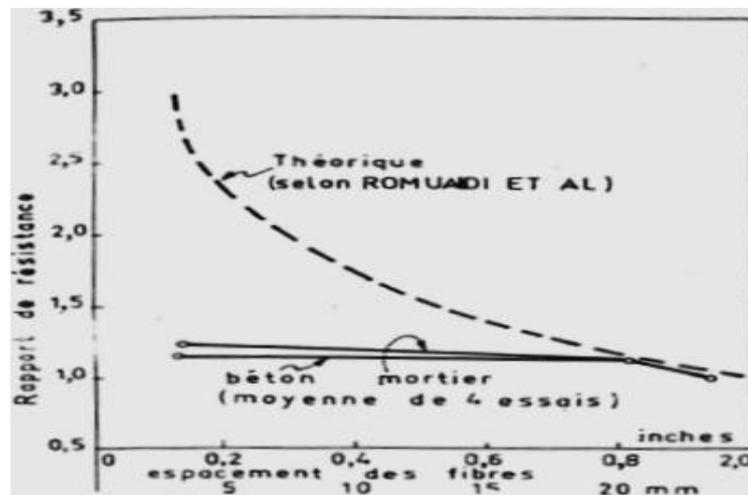


Figure (I-7) : Influence de l'espacement des fibres sur résistance à la fissuration du béton [17].

I.2.4.4 La notion de longueur critique

Pour étudier l'apport des fibres dans le mode de rupture de composite, il faut analyser le transfert de charge de la fibre vers la matrice. En effet, après fissuration de la matrice, selon la qualité de l'ancrage de la fibre, nous aurons rupture ou glissement de la fibre.

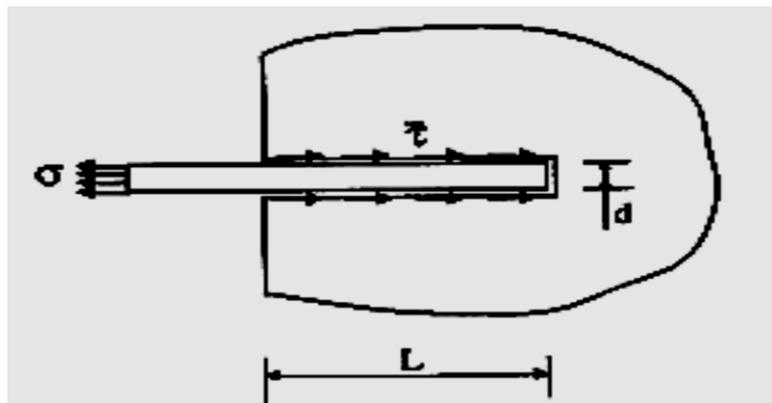


Figure (I-8) : Équilibres d'une fibre droite et alignée [16].

Le modèle élémentaire le plus simple consiste à équilibrer les efforts sur une fibre droite soumise à une charge de traction figure I-8.

En faisant l'hypothèse d'une distribution uniforme de l'adhérence, il est possible de définir une longueur critique L_c , telle que :

$$L_c = \frac{d}{4} \frac{\sigma_{fu}}{\tau} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

σ_{fu} : Contrainte de rupture de la fibre ;

d : Diamètre de la fibre ;

τ : Contrainte d'adhérence.

Par suite, si la longueur ancrée de la fibre excède (L_c), la fibre se rompt, sinon elle se décolle et glisse.

I.3 Le béton renforcé de fibres

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

I.3.1 Historique du béton de fibres

Depuis longtemps les fibres sont utilisées comme renfort de plusieurs matériaux de construction.

Les EGYPTIENS ont utilisé les pailles pour renforcer la brique de boue. Il ya aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile en Finlande, il y a de cela 5000 ans [18].

En ALGERIE, on trouve chez les anciens le pisé qui était de l'argile armée de paille hachée mise en place par compression pour produire ce qu'on appelle-le " Toub ". C'est une brique de terre stabilisée ou non, moulée manuellement et séchée à l'air libre. Ce type de matériaux est utilisé notamment au centre et au sud de l'Algérie en tant que matériau de maçonnerie et joint de murs.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER [19], qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

En 1912 WEARKLY [20], déposa un brevet aux U.S.A qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton figure I-9.

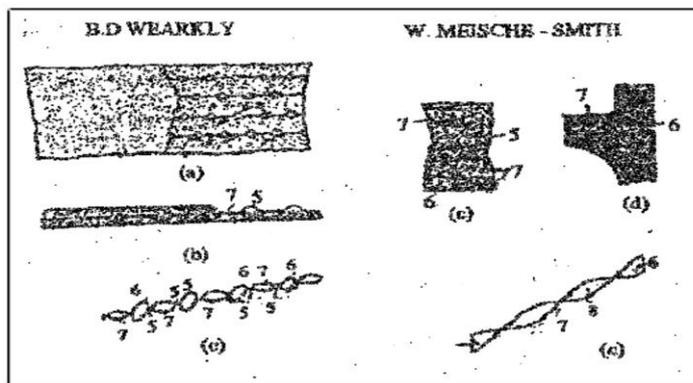


Figure (I-9) : Brevet de WEARKLY et SMITH (1920).

En 1914 le premier brevet britannique a été établi par FICKLEY [21], qui a décrit différentes pièces métalliques tortueuses. Il a confirmé que la résistance à la fissuration et à la fatigue a été améliorée, mais il a noté aussi qu'il n'y avait pas une amélioration dans la résistance du composite ni à la traction ni à la compression.

En 1920, A.KLEINLOGEL [22], a déposé le premier brevet allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier. A cette période-là, une étude sur les bétons renforcés avec des fibres de verre a été publiée par GRIFITH [18].

En 1933 en New Jersey, H.ETHERIDGE a inventé une technique pour améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution. Il a recommandé ensuite d'ajouter au béton des fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différent diamètre pour améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue du béton utilisé dans la construction des voies ferrées.

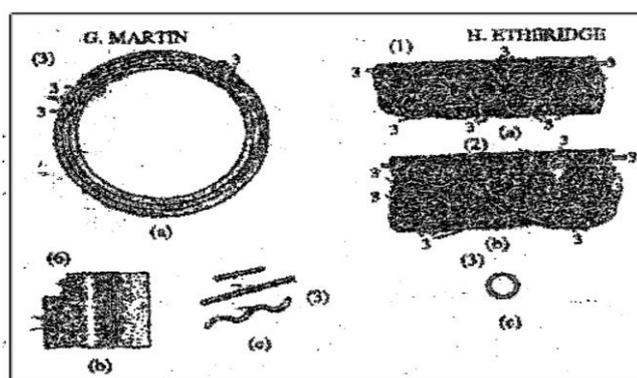


Figure (I-10) : Brevet de ETHERIDGE et al (1933).

Au début des années soixante, une série de brevets a été établie par Battelle Development Corporation [23]. Ces brevets sont basés sur l'utilisation des morceaux d'acier courts pour renforcer le béton. Les moyens expérimentaux à cette période ne permettant d'envisager que de

simples essais de compression ou flexion à charge contrôlée. Une amélioration dans la résistance à la traction, à l'absorption de l'énergie et à la résistance à l'usure a été rapportée dans ces brevets. Le premier article dans ce concept peut être attribué à Lankard et Sheets [24]. Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et à sa durabilité.

I.3.2 Mécanisme de rupture des bétons de fibres

Le béton est un matériau composite à matrice fragile. L'introduction de fibres a pour objectif le contrôle de la fissuration. Les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement à partir des années 60 grâce aux travaux de ROMUALDI, BATSON et MANDEL [25]. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile. Ils mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres (lié au volume introduit dans le béton) sur le comportement du composite.

ROSSI a proposé une description physique du fonctionnement de ces matériaux [26].

D'après lui, il faut considérer deux échelles d'action des fibres : *le matériau et la structure*. Soit un volume de béton de fibres soumis à une traction uniaxiale. On peut distinguer 3 phases sur la courbe effort - déplacement qui décrit son comportement figure I-11.

Dans la première phase, on observe une microfissuration diffuse, générée à partir des défauts initiaux et de l'hétérogénéité des caractéristiques locales du matériau. A ce stade, les fibres interviennent par couture des microfissures ce qui a pour effet de retarder leur coalescence. La phase 2 correspond à une localisation des microfissures, suivie par la propagation d'une macrofissure (phase 3) qui sépare le volume en deux blocs, entraînant alors un mécanisme de structure.

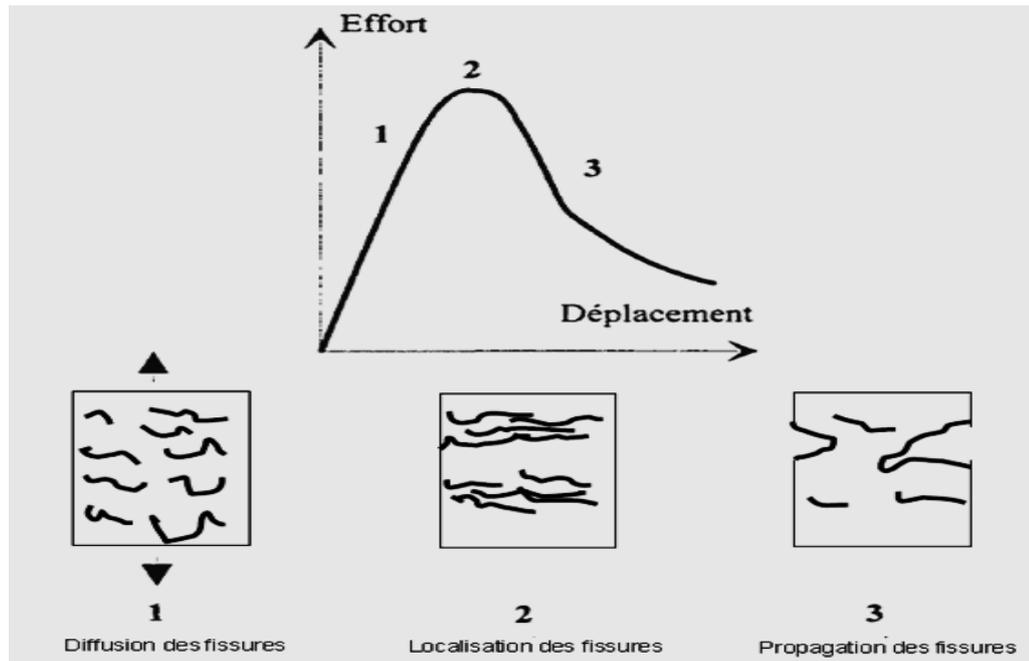


Figure (I-11) : Schématisation du comportement d'un bloc de béton soumis à une traction directe [26].

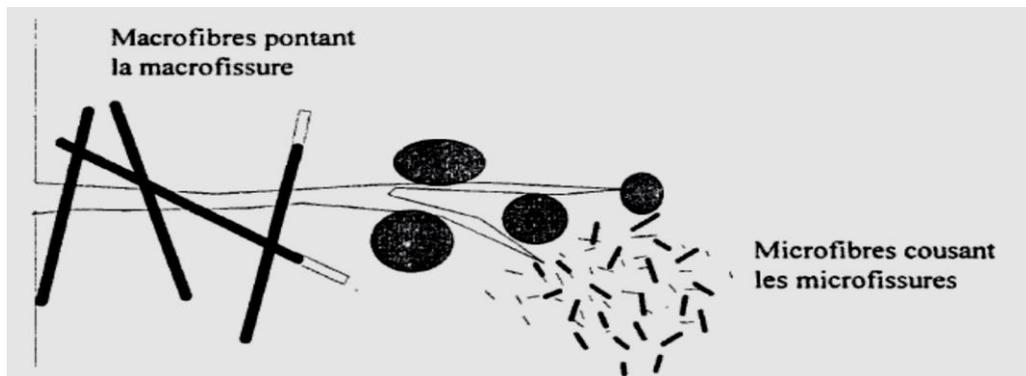


Figure (I-12) : Rôles des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton [12].

Seules des fibres fines (pour agir sur les microfissures et assurer leur ancrage) en grande quantité (pour couvrir l'ensemble du volume) peuvent donc apporter une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau en retardant le passage à la phase 2. En revanche, en phase 3, le pontage des macrofissures ne peut intervenir que par des fibres longues jouant un rôle similaire aux armatures dans le béton armé, même si le mécanisme d'ancrage est différent. Ce fonctionnement est résumé sur la figure I-12 [12].

I.3.3 corrosion des bétons renforcés de fibres d'acier

La corrosion dans les bétons renforcés de fibres d'acier, apparemment moins préjudiciable que dans le béton armé a souvent été considéré comme un phénomène mineur et de ce fait négligé. Cependant elle existe et son caractère préjudiciable ne s'exprime pas toujours en terme de résistance [27].

HALVORSEN et coll, ont accéléré le test de corrosion en maintenant des éprouvettes fissurées, sous un flot d'eau 62,8 °c, dirigé sur la fissure et chargé à 5% de chlorure de sodium. Ils ont constaté une corrosion évidente des fibres dans les fissures. Les deux auteurs ont également noté l'ampleur du phénomène de la corrosion de surface.

MANGAT.P.S et GURUSAN.K ont constaté des traces évidentes de corrosion de surface, après 150 cycles de 12 heures d'aspersion par de l'eau marine, puis 12 heures de séchage [28].

Le mécanisme de corrosion étant un mécanisme de pile électrochimique, qui implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique. La zone où la fibre est traversée par la fissure (diffusion importante d'eau et de chlorures) est le siège de la réaction anodique (oxydation), ce qui implique que les parties avoisinantes (non fissurées) de la fibre sont susceptibles d'être le siège de réactions cathodiques (réduction). En conséquence, la vitesse de diffusion de l'oxygène et des ions OH⁻ au sein du béton non fissuré, donc de sa porosité.

Ceci conduit à une situation complexe dans laquelle les fibres d'un BRFM très poreux (rapport eau / liant élevé) traversées par une fissure faiblement ouverte, peuvent se corroder plus rapidement que celles d'un BRFM peu poreux (rapport eau / liant faible), traversées par une fissure beaucoup plus ouverte. En conclusion, bien qu'aucune relation claire entre l'ouverture des fissures et la vitesse de corrosion ne soit actuellement établie, l'expérience montre que les fissures accélèrent, dans certaines conditions (présence de chlorures), cette vitesse de corrosion.

Dans le cas des fibres métalliques, ceci peut avoir une conséquence mécanique importante où du fait de leur section très petite (comparée à celle des armatures classiques du béton armé), elles pourraient se dissoudre totalement entre des fissures correspondant à un comportement de structure en service, et ainsi occasionner une diminution non négligeable de la capacité portante et donc du degré de sécurité des structures en BRFM [5].

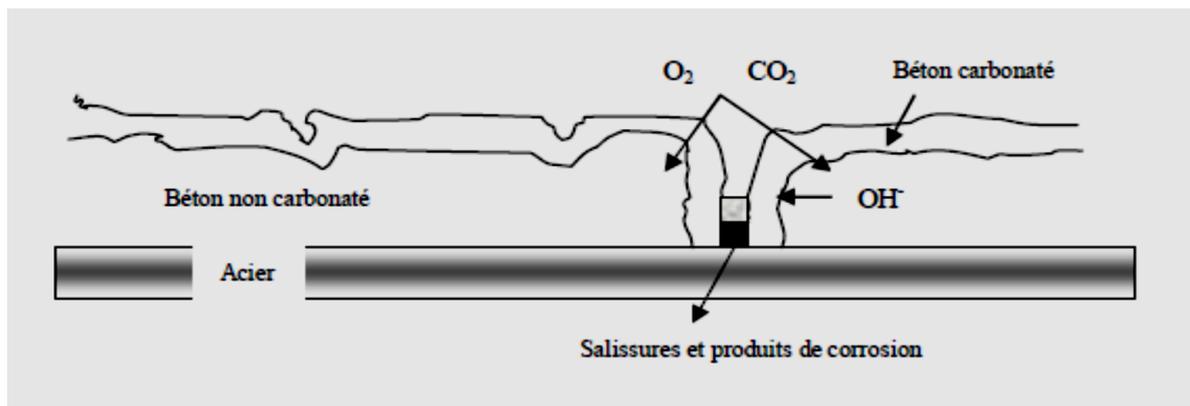


Figure (I-13) : Mécanisme de corrosion des fibres en présence de fissure, et sans pénétration des chlorures [29].

I.3.4 Propriétés mécaniques du béton renforcés par fibres métalliques

I.3.4.1 Introduction

Le comportement du béton de fibres diffère de celui du béton témoin. La nature et la géométrie et le volume des fibres utilisées jouent un rôle déterminant sur la propagation des fissures dans la matrice et améliorent la ductilité du béton.

Donc, on peut conclure que la résistance des bétons faits de matrices contenant des fibres courtes ou longues discontinues est contrôlée essentiellement par la liaison inter- faciale et par la qualité de la fibre renforçant en général aux différents paramètres.

La figure I-14, illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.

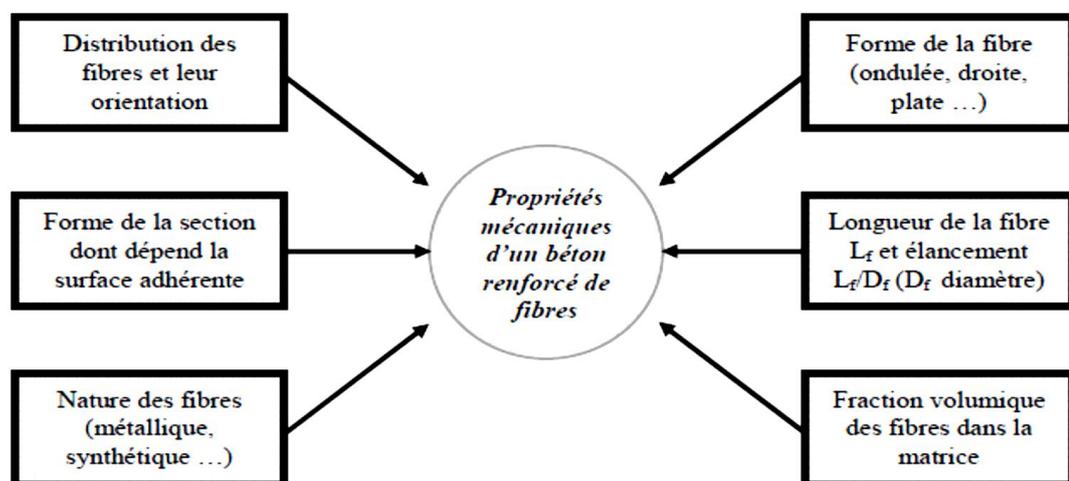


Figure (I-14) : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres [8].

I.3.4.2 Résistance à la compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences.

Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Cette diminution peut être causée par une mauvaise compacité due à un excès de fibres, ou à une mauvaise composition.

BEN YAHIA Abdeslam [30], a trouvé que l'incorporation de fibres de fil d'attache dans la matrice béton apporte une amélioration de résistance à la compression lorsque le pourcentage de fibres est $V_f=3\%$, et une diminution pour de forts pourcentages figure I-15.

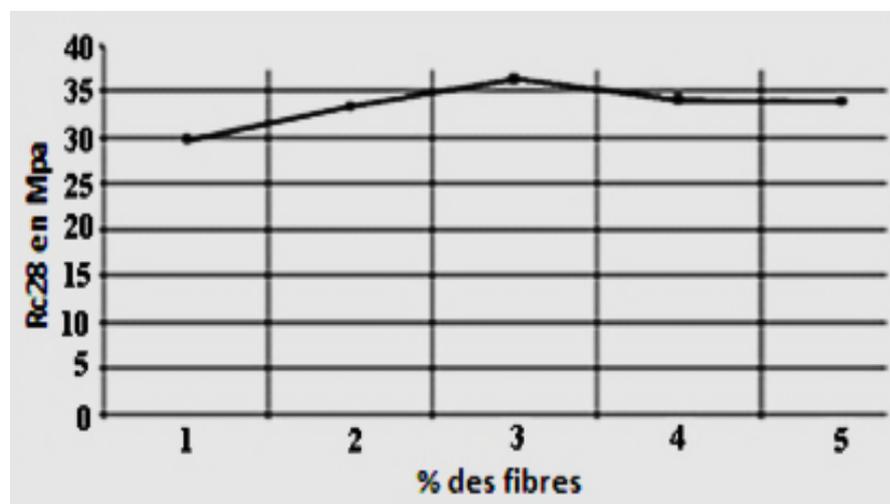


Figure (I-15) : Influence du % des fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres [30].

DARDAR. J [31], a montré cependant que la résistance peut être diminuée par l'addition de fibres dans le béton figure I-16. Il a conclu, dans son étude qu'à partir de $V_f = 0,5\%$, pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité. Suivant l'auteur cette diminution peut s'expliquer par une mauvaise homogénéité du béton et par une valeur E/C élevée, ou une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

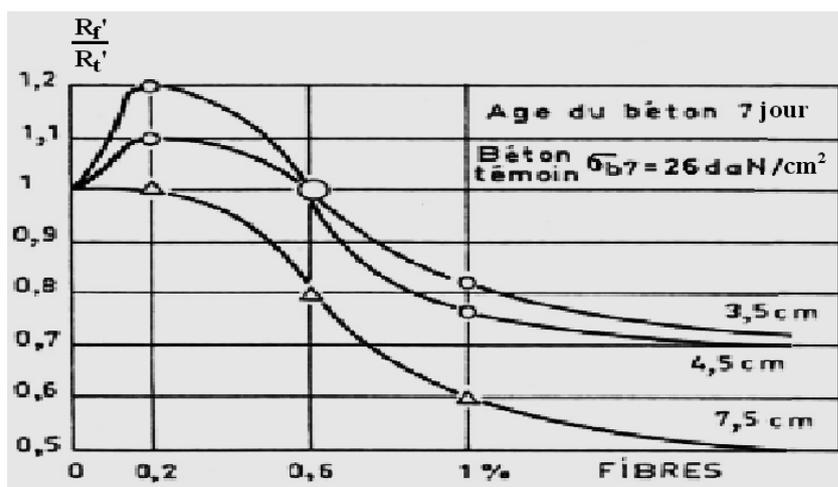


Figure (I-16) : Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres [32].

Rossi a conclu dans son ouvrage publié récemment [29], que les bétons de fibres métalliques, constitués de fibres longues, ont toujours des résistances en compression inférieure à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente. Tandis que, pour les fibres courtes, ROSSI a rapporté cette conclusion :

« Bien que l'augmentation des résistances en traction et en compression avec le pourcentage des fibres courtes soit le résultat le plus fréquemment attendu, et obtenu, on peut aboutir à une stagnation, voire une diminution de ces résistances pour certains pourcentages, notamment dans le cas de la compression ».

I.3.4.3 Résistance à la traction directe

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. Les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées, et bien sûr au béton témoin retenu [5].

De nombreux auteurs utilisent des essais de traction " indirecte " : l'essai de fendage ou l'essai dit de " module de rupture " (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint).

Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements.

Avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure. La figure I-17 montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe [8].

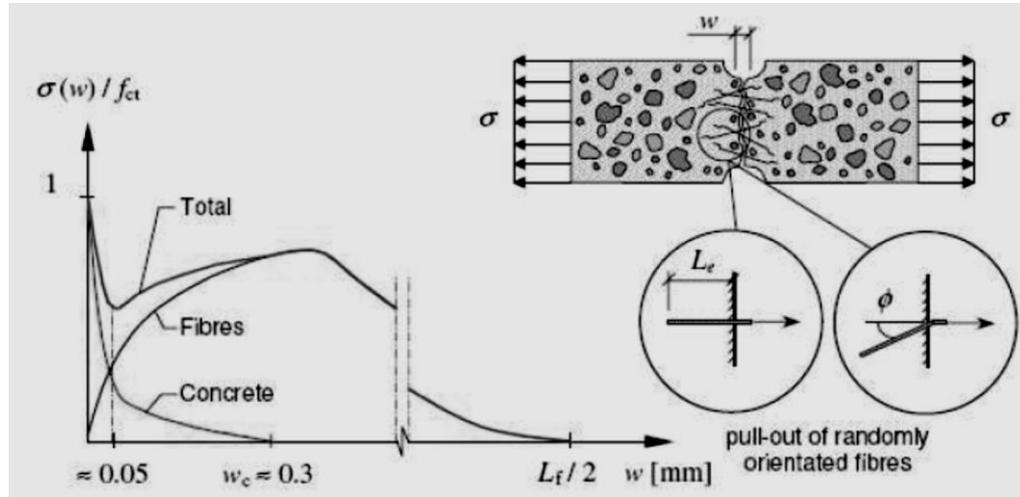


Figure (I-17) : Contribution des fibres dans le comportement à la traction [33].

JONHSTON et COLEMAN [34], montrent que la résistance de béton de fibres augmente de 5 à 30 % de la résistance en traction direct d'un béton non fibré.

Les deux chercheurs présentent une formule qui permet de calculer la contrainte en traction du béton de fibres (σ_t), en fonction du béton sans fibres (σ_m).

$$\sigma_t = \sigma_m \left[1 + 0.015 V_f \left(\frac{L}{d} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (I.5)$$

Avec :

σ_m : La contrainte en traction de la matrice ;

V_f : Étant le pourcentage, en volume des fibres ;

$\frac{L}{d}$: Étant l'élanement.

L'équation I.5 a l'intérêt de mettre en évidence les deux paramètres qui jouent un rôle primordial dans la résistance à la traction : la teneur en fibres à laquelle la résistance est directement et linéairement proportionnelle et l'élanement des fibres qui agissent dans le même sens de façon non linéaire.

I.3.4.4 Résistance à la flexion

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibres car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de changement dans ses applications. On ajoute les fibres dans la matrice pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

ABBANI Saïd [35], montre que l'augmentation du pourcentage en masse des fibres végétales de palmier dattier de longueur $L=4$ cm, améliore notablement la résistance à la flexion figure I-18.

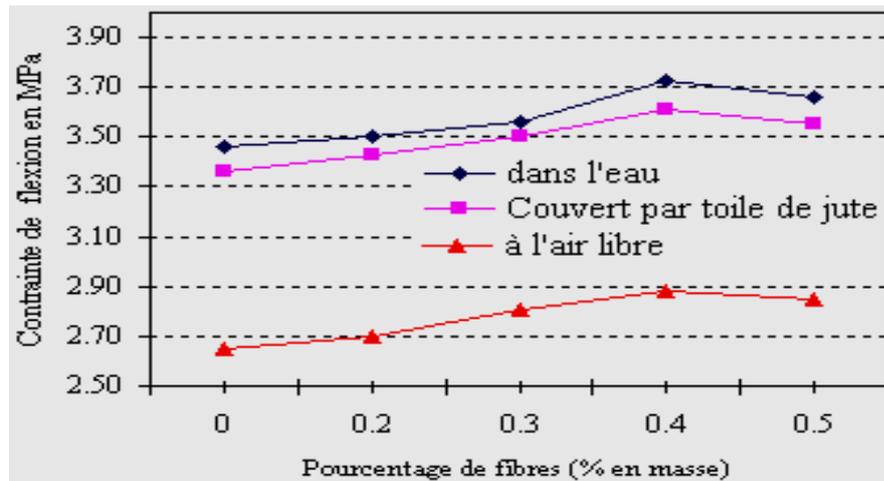


Figure (I-18) : Variation de la résistance à la flexion en fonction du % en masse des fibres [35].

Dans un rapport publié par A.C.I COMMITTEE 544 [36], les auteurs confirment que les fibres métalliques, introduites jusqu'à 4% par volume, ont été trouvées qu'ils augmentent la résistance de la première fissure deux fois et demi plus de celle de béton non renforcé de fibres.

BEN YAHIA Abdeslam [30], a trouvé que l'incorporation de fibres de fil d'attache dans la matrice béton apporte une amélioration de résistance à la flexion lorsque le pourcentage de fibres est $V_f=3\%$, et une diminution pour de forts pourcentages figure I-19.

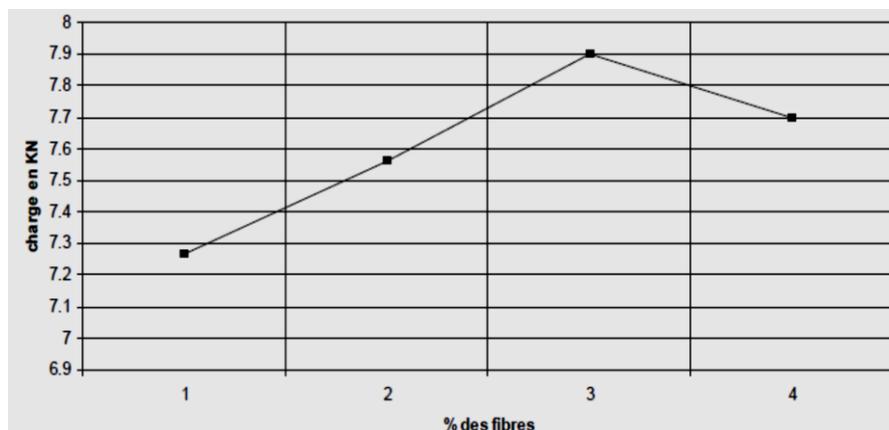


Figure (I-19) : Influence du % de fibres sur la résistance à la flexion [30].

BENTALHA et al [37], ont réalisé des essais de flexion 4 points sur des corps d'épreuve prismatiques de dimensions 10x10x120 cm³, Les résultats conclus de cette étude ont montré que:

- des résistances à la flexion à 7 jours améliorées.
- une énergie à la rupture supérieure à celle du mortier témoin (sans fibres).
- un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.

La figure I-20 illustre les Courbes charges – flèches de différents mélanges.

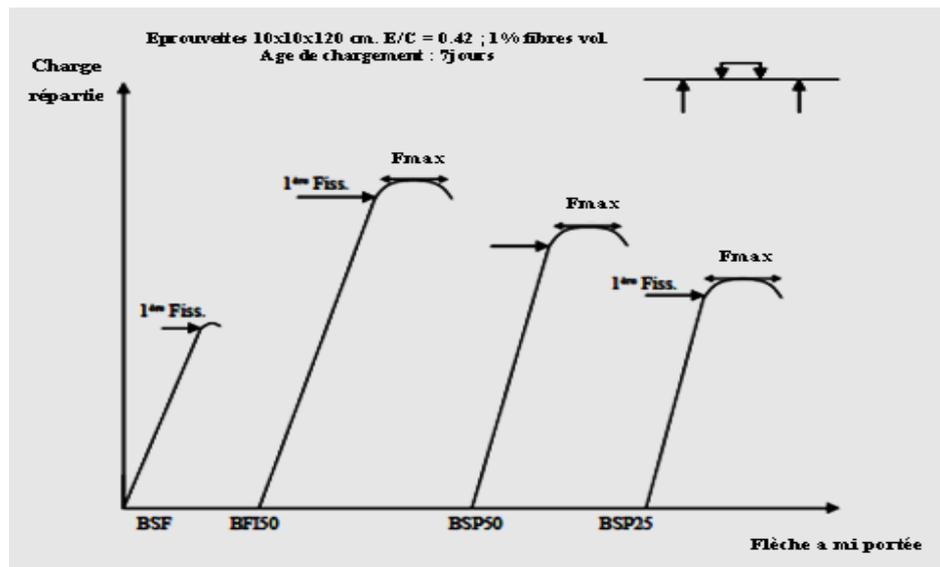


Figure (I-20) : Courbes charges – flèches [37].

Avec :

- BSF : Matrice témoin sans fibres.
- BFI50 : Matrice renforcée avec des fibres commercialisées (FI50).
- BSP50 : Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP50).
- BSP25 : Matrice renforcée avec des copeaux d'acier (SP25).

SWAMY [36], établit une formule de régression qui permet de prévoir la résistance à la flexion d'un béton de fibres, en fonction de celle de béton sans fibres :

$$\sigma_f = 0,97 \cdot \sigma_b \cdot (1 - V_f) + 3,14 \cdot V_f \cdot \frac{L}{d} \quad (I.6)$$

Avec :

σ_f : Résistance à la flexion du béton de fibres ;

σ_b : Résistance à la flexion du béton témoin ;

V_f : Pourcentage des fibres, en volume ;

$\frac{L}{d}$: Élancement des fibres.

I.3.4.5 Résistance à la fatigue

DEHOUSSE [38], a réalisé des essais de flexion alterné, sous charge comprise entre 0 et 0,6 fois la charge de rupture, et avec une fréquence de 30 cycles/ secondes. Il a conclu qu'un béton armé de 0,75 % de fibres résiste 12 fois plus de cycle que le même béton sans fibres avec une diminution de 50 % de charge de rupture.

BATSON et al [39], ont réalisé des essais sur des éprouvettes de béton renforcé de 2 et 3 % de volume de fibres d'acier avec l/d varie de 70 à 90. Les résultats conclus de cette étude ont montré que le béton de fibres d'acier, avec un volume de fibre de $V_f = 3\%$, résiste 2×10^6 cycles jusqu'au 75 % de la contrainte de la première fissure, mais avec 2% de volume de fibres, la capacité de la contrainte diminue 50% pour la même vie de fatigue (2×10^6).

I.3.4.6 Résistance au choc

La résistance aux chocs, qui est l'énergie de rupture sous charge impulsive, fournit une indication sur la fragilité d'une pièce de forme donnée, ou sur éprouvette et dispositif normalisés d'un matériau donné.

BAKHTI et al [40], l'étude de la ductilité des nœuds de structures poteaux - poutres en béton de fibres métalliques, montrent que l'utilisation des fibres métalliques dans les nœuds où le ferrailage est très complexe ; est avantageux pour l'amélioration de la performance telle que la ductilité, Ainsi Le taux de dégradation de rigidité est moindre en comparaison avec le béton conventionnel armé.

I.3.4.7 Résistance à l'usure

JOHNSON signale que la résistance à l'abrasion n'est pas sensiblement augmentée d'autre auteurs affirment qu'après élimination de la laitance superficielle et mise à jour des fibres, la résistance est améliorée d'environ 15% [4].

I.3.4.8 Retrait et Fluage

I.3.4.8 .1 Retrait

Le retrait du béton est à l'origine d'une fissuration qui peut être importante. On entend par retrait les déformations d'origine thermique ou hydrique du béton.

Une des méthodes couramment utilisées pour réduire le phénomène de la fissuration de retrait est l'introduction dans le matériau à l'état frais de fibres minces et courtes, les fibres permettent de limiter ou de diminuer la formation des fissures.

ABDOU K et al [41] montre que les fibres diminuent le retrait, cette diminution est de l'ordre de 16 à 20 % par rapport au mortier sans fibres à 90 jours. Il y a très peu de différence entre les deux types de fibres (environ de l'ordre de 9 %), cette différence croît avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques.

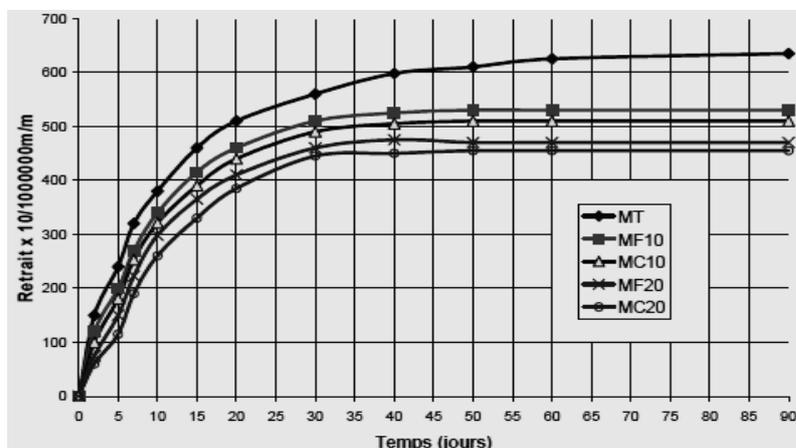


Figure (I-21) : Influence de la nature et la quantité des fibres sur le retrait à 20°C et 55% HR [41].

Avec :

MT : Mortier témoin ;

MF10 : Mortier renforcé de 1 % de fibres métallique industrielles ;

MF20 : Mortier renforcé de 2 % de fibres métallique industrielles ;

MC10 : Mortier renforcé de 1 % copeaux d'acier ;

MC20 : Mortier renforcé de 2 % copeaux d'acier.

MANGAT et AZARI [42], trouvent une réduction du retrait de 35 % a été obtenue avec 3% de fibres d'aciers de 22,50mm de longueur pour un béton de composition (C=1 ; S=2,50 ; G=1,20 ; E=0,58).

I.3.4.8.2 Fluage

Le fluage du béton dû à l'action d'une contrainte consiste dans une augmentation graduelle des déformations dans le temps [43].

Il a très peu d'information sur le fluage du béton de fibres. Au LCPC, des essais ont montré un comportement tout à fait semblable à ceux d'un béton sans fibres. Johnson Rapporte les résultats d'une étude de fluage en flexion qui montre une diminution des flèches.

SWAMY R N et al. Prouvent que le renforcement du béton par les fibres diminue considérablement le fluage [44], c'est -à- dire la déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60 % de celui d'un béton ordinaire et fluage en compression, 10 à 20 %.

ROSSI. P [29], il existe deux types de fluage d'origine physique différente qui interviennent simultanément dans la vie d'une structure :

- Un fluage homogène appelé fluage propre qui est lié au mouvement de l'eau au sein du matériau.
- Un fluage hétérogène dû à un effet de structure provoqué avec les échanges avec l'extérieur.

I.3.4.9 Durabilité

La durabilité est une propriété importante qu'il est nécessaire d'établir pour tous les matériaux de construction, et pour les nouveaux en particulier, dans différentes conditions d'environnement et d'exposition.

La durée de vie d'un composite dépend de la durée de vie de chacun de ces constituants, fibres et matrice, qui sont exposés à des conditions d'environnement variables dans le temps [45].

La durabilité du béton est liée à la facilité de pénétration des substances telles que le dioxyde de carbone, les chlorures, l'oxygène et l'eau. Les problèmes liés à la compacité du matériau influent sur l'altération des composants du béton. Le béton peut être attaqué par plusieurs facteurs, qui le dégradent plus ou moins. Ceux-ci peuvent être classés comme endogènes et exogènes et leurs origines sont variables [5].

Tableau (I-2) : Facteurs influents sur la durabilité [5].

Origine	Endogène	Exogène
Chimique	- hydratation - alcali-réaction	- carbonatation - pénétration d'agents agressifs
Physique	- auto dessiccation - chaleur d'hydratation	- température - hygrométrie
Mécanique	- granulats	- sollicitations de service - sollicitations accidentelles

La seule problématique de durabilité spécifique aux bétons renforcés de fibres métalliques est la corrosion des fibres. Si l'on doit faire une comparaison avec les bétons non fibrés, le phénomène est assez similaire à la corrosion des armatures de béton armé.

BAKKER en 1988 selon [29], l'observation faite par ce dernier sur les ouvrages en service et des expériences de laboratoire montre qu'il n'y a pas, statiquement, de relation directe entre l'ouverture de fissure et le degré de corrosion lorsque cette ouverture ne dépasse pas 0,3 - 0,4 mm.

I.3.4.10 Résistance au feu

Les BFM ont, en général, un meilleur comportement au feu que le béton armé (à matrice équivalente bien évidemment) [29].

EZZIANE, et al [46]. Analysent expérimentalement l'influence de la présence des fibres d'acier (0,58 % en volume) dans le mortier à partir des essais de traction et de compression aux températures élevées. Les résultats conclus de cette étude ont montré que

Entre 400 et 700°C, l'ajout des fibres d'acier permet :

- Une meilleure résistance à la déformation (meilleure ductilité), ce qui se traduit par une rupture graduelle plutôt que soudaine : les efforts de pontage sont transmis par les fibres aux surfaces de fracture. L'énergie dissipée avant la ruine de l'échantillon est très nettement augmentée.
- Une augmentation nette de la résistance à la compression de l'ordre de 30 %.
- Une augmentation très appréciable de résistance à la traction.

La perte de résistance sur la résistance initiale, quant à elle, varie en fonction de la variation de la température, à savoir :

- Entre 400 et 500°C, la perte de résistance est de l'ordre de 30 %. Cette perte est considérée comme acceptable car elle ne cause pas de désordre gênant.
- Au-delà de 500°C, la perte de résistance devient considérable et crée une instabilité de la structure qui peut conduire à la ruine.

Enfin, on peut conclure qu'en tenant compte du critère de perte de résistance, l'introduction des fibres métalliques est très efficace sur le comportement mécanique tant que la température n'excède pas le palier de 500°C.

I.3.5 Application du béton renforcés par fibres

Depuis une trentaine d'années, que le concept de béton de fibres a été connu, de nombreux travaux de recherche ont montré que l'ajout de fibre d'acier dans une matrice de béton permet d'apporter des propriétés très intéressantes au composite face aux phénomènes de fissuration.

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

I.3.5.1 Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles :

Dans ce cas on introduit les fibres dans les éléments structuraux en béton armé soumis à des sollicitations combinées afin de majorer la résistance et la rigidité des éléments concernés.

I.3.5.2 Le béton renforcé de fibres seules

Dans ce cas on utilise les propriétés des bétons de fibres qui seront liées à plusieurs paramètres. Ces paramètres sont généralement le type et les propriétés de matrice utilisée, type et propriétés des fibres utilisées, ainsi que la méthode de mise en œuvre retenue.

Tableau (I-3) : Illustre quelques applications de bétons renforcés de fibres et leurs intérêts [8].

APPLICATIONS	INTERETS APPORTES PAR L'AJOUT DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	- Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations ...)	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	- Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries souterrains	- Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé - Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement



Bétons de fibres pour des formes exceptionnelles ou pour des panneaux décoratifs.



Panneaux légers et colorés en Béton de fibres.

Figure (I-22) : Intérêt de béton de fibres pour différents usages [47].

I.3.5.3 Domaine en dehors du génie civil

Il existe un certain nombre d'applications des BFM en dehors du génie civil. Ces applications peuvent, en fait, être considérées comme marginales (ce qui ne veut pas dire non intéressante du point de vue économique) au regard des tonnages de fibres qui sont consommés par rapport aux autres applications industrielles (dallages industriels, béton projeté...). On peut ainsi citer :

- Les fosses toutes eaux ;
- Les caveaux funéraires monoblocs ;
- Les séparateurs d'hydrocarbure [48].

I.3.5.4 Quelques exemples d'ouvrages construits en béton de fibres

- Réalisation de 52700 m² de chaussées de parking à l'aéroport de LAS-VEGAS (USA), avec 2% de fibres métalliques. L'épaisseur des chaussées était de 15 cm, au lieu de 37.5 cm pour un béton traditionnel.
- Réalisation de 33400 m² de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de TAMPA-NEVADA (USA), avec 2% de fibres métalliques.
- Réalisation de la piste de l'aéroport de TAMPA (USA), avec 1.5% de fibres métalliques.
- Consolidation de voutes en briques des tunnels ferroviaires près de BIRMINGHAM (Angleterre) [43].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons résumé:

- ❖ En trouve une gamme très variée de fibres susceptibles d'être utilisés comme renfort des matrices cimentaires. qui se différencient par leur nature, leur forme, leur diamètre, leur longueur. Elles possèdent des caractéristiques physiques et mécaniques différentes les unes des autres.
- ❖ Les fibres limitent les phénomènes de propagation rapide et instable de la rupture du béton. Elles modifient les chemins de fissure dans le matériau.
- ❖ La viscosité plastique augmente au fur et à mesure que la concentration en fibres augmente.
- ❖ Le dosage et l'orientation des fibres de façon aléatoire au sein de la matrice cimentaire, peut conduire à un phénomène de chevauchement des fibres qui conduisent :
 - Chute de la maniabilité ;
 - la mauvaise compacité ;
 - une baisse de la résistance.
- ❖ L'utilisation du béton armé de fibres permet d'exploiter la plus grande résistance à la traction et à la fatigue du matériau. Une orientation adéquate des fibres dans la matrice béton lui confère des propriétés isotropiques qui ne peuvent être obtenues en aucun cas pour le béton ordinaire.
- ❖ La durabilité de béton de fibres dépend essentiellement de la corrosion des fibres.
- ❖ le béton de fibres permet de renforcer certaine zone fragiles d'une ossature, telles que les connexions poteaux-poutres particulièrement sensibles aux séismes, les sections fortement cisailées, ou les points susceptibles de subir un chargement dynamique.

CHAPITRE II :
RHÉOLOGIE DU BÉTON RENFORCÉ PAR DES
FIBRES

II. Rhéologie du béton renforcé par des fibres

II.1 Ouvrabilité du béton renforcé par fibres métalliques

II.1.1 Introduction

Le béton est constitué de composants de caractéristiques morphologie, mécaniques et physico-chimiques très divers : ciment, granulats, eau et le plus souvent d'adjuvants et d'ajout. Chacun de ces constituants joue un rôle différent dans le comportement des matériaux, notamment à l'état frais.

Le béton armé de fibres métalliques, bien connu de nos jours, Si l'incorporation des fibres métalliques dans la matrice de béton, très fragile en traction, améliore le comportement mécanique du béton de fibres (notamment en traction par flexion, en post-fissuration), à l'inverse, à l'état frais, un ajout important de fibres diminue l'ouvrabilité de ce matériau [10].

Trois paramètres apparaissent déterminants pour une mise en œuvre correcte, et des gains sur le plan de comportement mécanique [27] :

- Le volume des fibres (V_f) ;
- La longueur des fibres ;
- Le squelette granulaire.

II.1.2 Formulation, Fabrication et Mise en œuvre

II.1.2.1 Formulation du béton de fibres métalliques

L'optimisation de la composition des BFM est un passage obligé dans l'ingénierie de ce matériau. La formulation de ces matériaux ne peut pas, et ne doit pas se résumer, à l'introduction directe d'un certain pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres. En effet, cette introduction perturbe l'arrangement granulaire de la matrice, ce qui a pour double conséquence de diminuer la maniabilité du matériau, et d'altérer sa compacité [29].

L'introduction des fibres dans une composition, préalablement optimisée, perturbe l'arrangement du squelette granulaire, ce qui conduit à la diminution de la maniabilité et à l'augmentation du volume des vides.

MOENS, propose des limites au paramètre (V_l/d) qui caractérise bien l'effet de volume de fibres et l'élancement de la fibre. Il a pris en compte le dosage et la dimension du granulat [4].

Une étude approfondie de la formulation des bétons de fibres a été entreprise au LCPC par SERNA ROS. L'étude propose une relation empirique entre le module de finesse du béton sans fibres (M_{io}) et le module de finesse (M_{ip}) du béton ayant un pourcentage en fibres $P_i(\%)$ [43].

$$M_{ip} = \frac{(M_{io} - P_i)(M_{io} - 5,16)}{1,8} \quad (\text{II.1})$$

Cette relation est traduite sur la figure II-1.

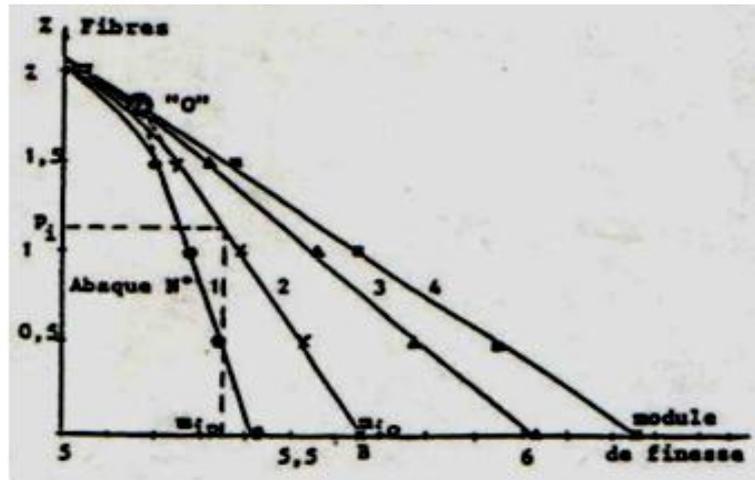


Figure (II-1) : Abaque de formulation du béton de fibres.

L'auteur remarque aussi qu'en faisant varier le dosage en ciment (entre 325 et 475 kg/m³), la granulométrie optimale ne se trouve pas modifiée (vérifiant ainsi un des postulats de la méthode de BARON-LESAGE).

Les conclusions de l'étude de SERNA ROS sont les suivantes :

- pour des bétons ayant un faible module de finesse (béton de petits granulats il est possible d'ajouter des fibres jusqu'à 1% (en volume) sans précaution particulières, et jusqu'à 2% et plus, en contrôlant bien la fabrication effet, avec de 1% de fibres, une faible variation de dosage en eau provoque la formation de pelote de fibres (oursin) ;
- Pour des bétons ayant un module de finesse élevé (béton de gros granulats il faut limiter la teneur en fibres à 0,5 ou 0,6% (en volume) avec des dosages voisins de 0.5 ou 0.6%, tout excès de fibres risque d'entraîner la formulation d'oursin.

Pour la composition d'un béton, la méthode BARON – LOSAGE (1965) est basée sur deux hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience :

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

II.1.2.1.1 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par SERNA.ROS

En se basant sur la méthode BARON-LESAGE par SERNA .ROS [49], a été établi un abaque pour la formulation des bétons de fibres métalliques. Les mesures de maniabilité sont faites à l'aide du cône d'ABRAMS.

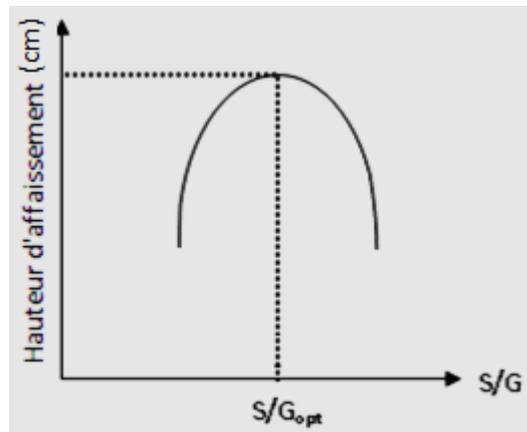


Figure (II-2) : Détermination du rapport S/G optimal d'après SERNA .ROS [49].

II.1.2.1.2 Adaptation de la méthode de BARON-LESAGE par P. ROSSI

Ainsi pour P.ROSSI [50], la méthode de BARON-LESAGE a été la base pour élaborer sa méthode d'optimisation. Cette méthode se résume dans les trois étapes suivantes :

- Fixer au départ le rapport E/C ainsi que le pourcentage des fibres à introduire dans le mélange ;
- Déterminer le rapport S/G optimal pour lequel la maniabilité est la plus grande ;
- Faire varier la quantité d'eau et de ciment, ainsi que la quantité de superplastifiant, afin d'obtenir la maniabilité souhaitée.

Des mesures de maniabilité ont été faites à l'aide du maniabilimètre LCL.

Donc la courbe d'optimisation représente la variation du temps d'écoulement en fonction de la variation du rapport S/G.

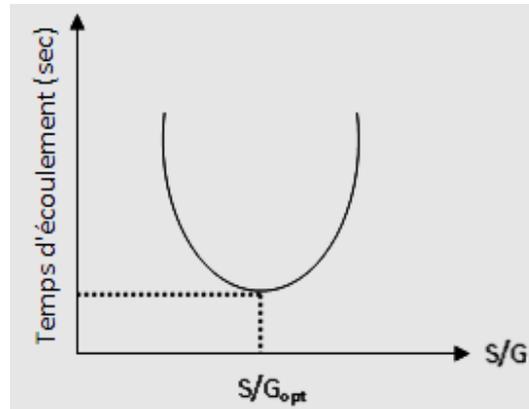


Figure (II-3) : Détermination du rapport S/G optimal d'après [50].

II.1.2.2 Fabrication de béton renforcé de fibres métalliques

Le malaxage du béton de fibres est important. En effet il faut obtenir une bonne disposition des fibres dans le mélange et éviter la formation de boule de fibres.

Le comité 544 de l'ACI [36], recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées et le matériau recherché :

- a- Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur ;
- b- On ajoute le ciment et l'eau après avoir mélangé les gravillons et le sable. Cette méthode est valable pour les fibres polypropylènes de façon à les défibrilliser ;
- c- Ajouté les fibres en fin du malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

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

Les super plastifiants incorporés aux bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

Pour les fibres métalliques, le comité 544 de l'ACI [36], conseille d'ajouter les fibres sous forme de pluie, en les faisant passer à travers un tamis munis d'un vibreur.

Pour éviter ces complications la société Bekaert propose des fibres collées ensemble par paquets à l'aide d'un produit qui se dissout dans l'eau de gâchage, on peut ainsi ajouter les fibres au mélange sans précaution particulières. Le transport du béton de fibres peut se faire en général avec des malaxeurs classiques, en prenant avec précaution de charger le camion avec une capacité inférieure au maximum, car il faut plus d'énergie pour malaxer un béton de fibres que pour malaxer un béton classique [4].

Dans certains procédés de fabrication, les fibres sont ajoutés au dernier moment ce qui évite l'usure des canalisations. Les compositions de béton de fibres projetées sont en générales voisines de celles du béton projeté sans fibres [51].

II.1.2.3 La mise en œuvre du béton renforcé de fibres métalliques

Les méthodes actuelles de formulation des BFM permettent d'obtenir des BFM à la maniabilité souhaitée, même lorsque le pourcentage de fibres incorporé est important. Il est donc permis de penser que les BFM ne présentent pas de problèmes de mise en œuvre plus importants que le béton non fibrés. Ceci s'avère globalement vrai, si ce n'est que certains aspects technologiques spécifiques aux BFM qui doivent être prise en considération si l'on veut réaliser un " bon " bétonnage. Par contre, et ceci constitue un point capital dans l'ingénierie des BFM, les caractéristiques mécaniques ultérieures du BFM in situ sont fortement dépendantes de sa mise en œuvre, et du type de structure considéré.

Lorsqu'on met en œuvre un BFM dont la formulation a été préalablement optimisée, il est important de connaître, et de tenir compte de certaines spécificités de ce BFM liées à la technologie de mise en œuvre adoptée et du type de structure.

Ces spécificités peuvent se décliner de la manière suivante :

- L'orientation préférentielle des fibres ;
- Les effets de " voûte ", ou d'écran ;
- Les effets de " cheminée " ;
- La ségrégation des fibres ;
- L'appauvrissement en fibres ;
- La relation entre le rapport L/d de la fibre et la maniabilité du BFM [29].

II.1.2.3.1 Technique de mise en œuvre du béton de fibres

Le choix de procédé de mise en œuvre dépend du domaine d'application, des performances et critères de production visés. Suivant la nature et la forme des fibres, les techniques de mise en œuvre varient. D'après ODELBURG, G(1985), la longueur des fibres doit être adaptée dans chaque cas en fonction des techniques de mise en œuvre retenues figure II-4.

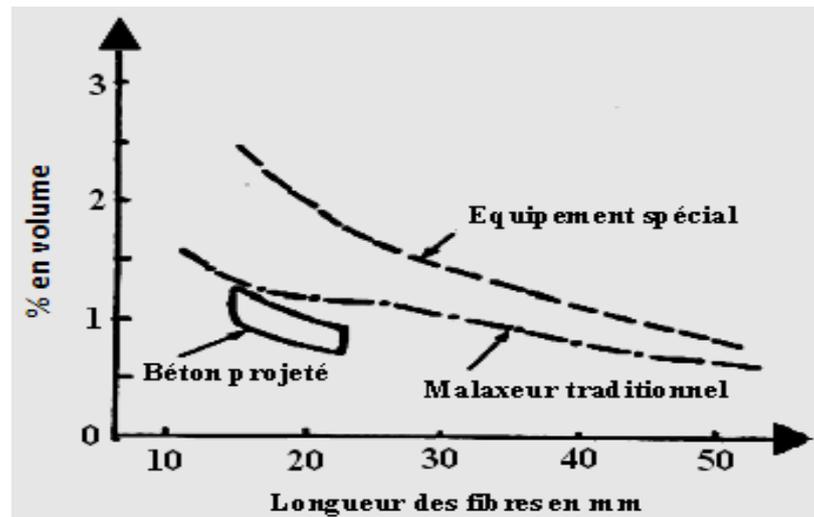


Figure (II-4) : Limites technologiques pour la mise en œuvre du béton de fibres d'acier [52].

II.1.3 Les méthodes de mesure de l'ouvrabilité du BFM

La mesure de l'ouvrabilité de béton conventionnel peut-être mesuré soit avec des méthodes à base d'écoulement statique, ou par des méthodes à base d'écoulement dynamique.

Mais pour le béton de fibres, les chercheurs ont utilisé pratiquement les mêmes appareils que ceux utilisés pour l'étude du béton et mortier frais, tout en essayant d'éliminer ou de modifier certains appareils qui paraissent mal adaptés pour l'étude du béton de fibres.

EDINGTON .J [53], a utilisé une étude trois méthodes pour évaluer l'ouvrabilité du béton renforcé de fibres: l'essai d'affaissement, l'essai de compactage et l'essai de Vé-Bé d'acier. Pour l'essai de compactage, il a eu des difficultés, parce que dans la plupart des cas, la matrice était très cohésive et ne tombait pas librement à travers le réservoir de l'appareil. Il était devenu nécessaire de faciliter le passage du mortier à l'aide d'une baguette. L'addition des fibres au mélange augmentait ce problème, il était nécessaire de forcer le passage du composite à travers le réservoir, ainsi cet essai ne paraît pas être adapté à l'étude du béton de fibres. En effet, les résultats obtenus avec cet essai montrent difficilement exploitables contrairement aux résultats obtenus avec l'essai de Vé-Bé.

L'essai d'affaissement présente un affaissement nul en général pour les bétons de fibres ce qui limite son utilisation. Toutefois BALAGURY et al [54], ont montré qu'il existe des relations entre l'essai Vé-Bé et le Slump pour les bétons et les bétons de fibres très ouvrables.

EDINGTON .J [53], a jugé que l'essai Vé-Bé est plus performant que les essais d'affaissement et l'essai de compactage.

SWAMY et al [44] ont indiqué que l'essai d'affaissement au cône inversé (cet essai utilise la vibration interne du béton) est aussi adapté au béton de fibres. De plus il existe une relation directe entre le temps Vé-Bé et l'essai du cône inversé figure II-5.

Le cône inversé présente cependant, une meilleure compatibilité du mélange de fibres.

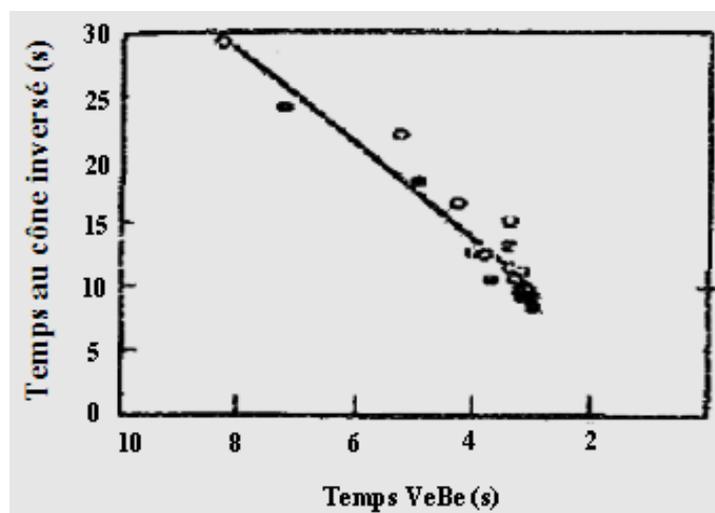


Figure (II-5) : Variation du temps au cône inversé en fonction du temps Vé-Bé pour les fibres d'acier [44].

Rossi préconise l'utilisation du maniabilimètre LCL [55], pour la mesure de la maniabilité, lorsque le dosage en fibres est important. Cet appareil figure II-6 quantifie la maniabilité par le temps d'écoulement d'un volume fixé de béton dans un récipient soumis à une vibration. Cette méthode de mesure est particulièrement adaptée aux bétons de fibres. En effet, les fibres forment un enchevêtrement qui limite l'écoulement statique, rendant ainsi inutilisable un essai comme le cône d'ABRAMS lorsque la teneur en fibres est élevée. En revanche, la vibration diminue le seuil de cisaillement au repos ce qui rend possible l'écoulement [56]. De plus, le maniabilimètre utilise un volume de 30L qui est plus représentatif que les 6 L du cône d'Abrams [12].

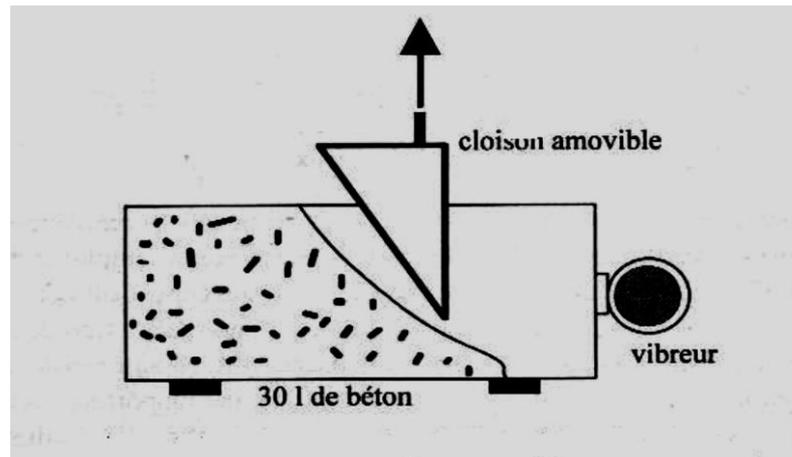


Figure (II-6) : Maniabilimètre LCL : schéma de principe.

II.1.3.1 Effet des agrégats et les fibres d'acier sur l'ouvrabilité

En générale, l'addition des fibres d'acier dans un béton hydraulique est déterminée lorsqu'on cherche à améliorer certaines qualités comme celles citées- ci- dessous :

- D'une part au niveau du parement moindre fissuration au retrait ou meilleure ténacité, résistance à l'usure ou plus grande dureté,...etc ;
- Et d'autre part en masse : meilleure ductilité de la structure fibrée, résistance au choc, résistance aux différentes sollicitations,...etc.

Les facteurs qui influencent la maîtrise de ces deux problèmes sont nombreux et les plus importants sont : la taille et la rugosité des granulats, la formulation granulométrique, la longueur et le diamètre en fibres. Ces facteurs jouent un rôle important dans la mise en œuvre du béton et ensuite dans la détermination des propriétés mécaniques finales [4].

II.1.3.1.1 La taille et la rugosité des granulats

Du point de vue granulométrie on peut dire que les fibres s'accrochent mieux avec les bétons relativement fins dont le diamètre maximal des grains est de l'ordre du quart de la longueur de la fibre ($1/4 L_f$).

Donc la granulométrie est étroitement liée à la dimension de fibres, les granulats doivent être de dimension telle qu'un encadrement par les fibres soit possible figure II-7.

Il est conseillé de limiter la grosseur des granulats et d'utiliser des micro-bétons sur dosés en grain de taille inférieur à 5 mm [27].

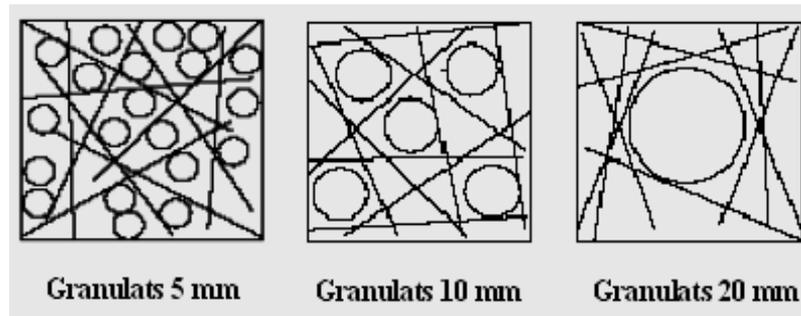


Figure (II-7) : Encadrement des granulats par les fibres métalliques.

Les essais de EDINGTON [53], concernent la variation du temps en fonction du diamètre maximal des granulats figure II-7 et II-8 illustrent bien ce fait. Ce qui nous montre, bien que la liberté de mouvement de la fibre soit bien meilleure lorsqu'elle ne rencontre pas de gros éléments.

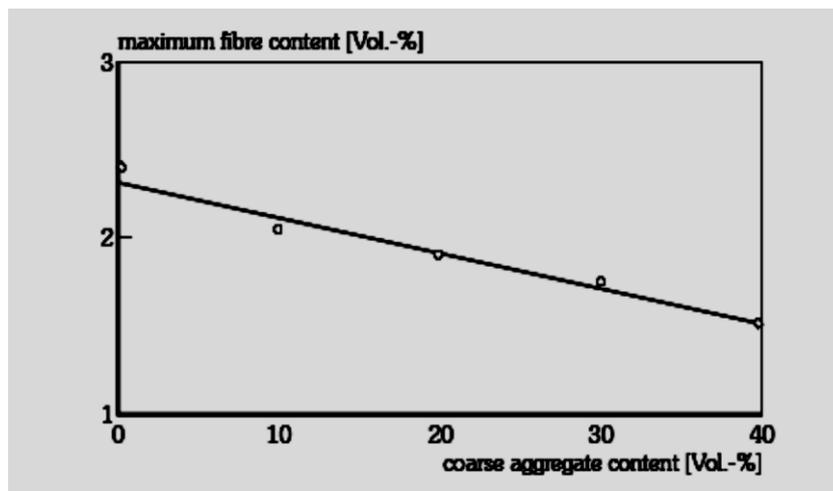


Figure (II-8) : Teneur maximale en fibres en fonction de la teneur en gros granulats [Swamy et Mangat].

Une forte réduction de l'ouvrabilité se produit lorsqu'on augmente la teneur des grains de dimension supérieure à 5 mm dans le mélange, le rajout des fines diminue également l'ouvrabilité [57].

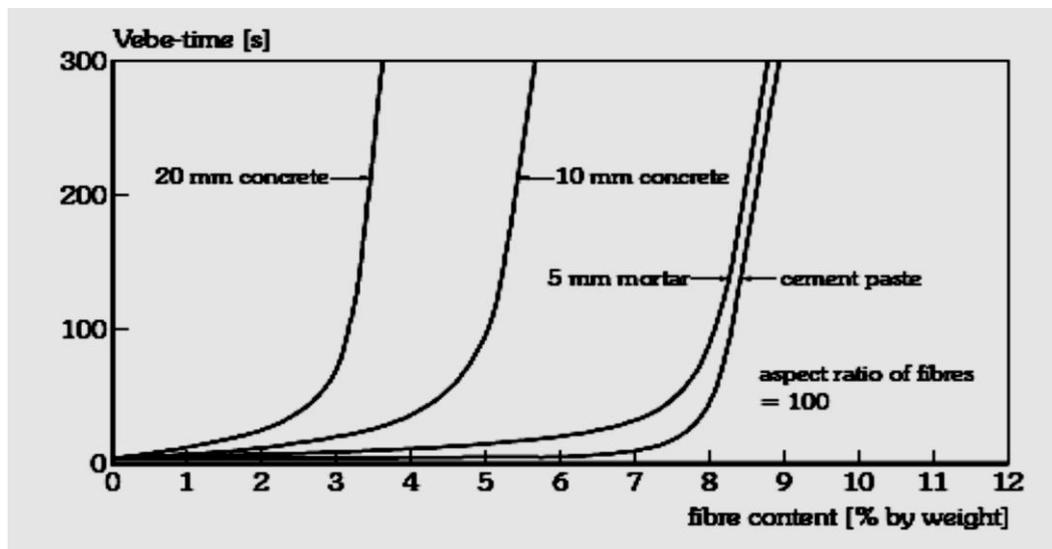


Figure (II-9) : Relation entre le temps d'écoulement et le teneur en fibre (%) [57].

L'USCOLD CONCRETE COMMITTEE (1981) propose des fuseaux Granulométriques pour trois types de matrices : les mortiers 0/5 mm, les bétons fins 0/9mm ou les bétons moyens 0/19 mm. Le dosage volumique en fibres métalliques est limité à [27] :

- 1% pour les granulats de taille maximale 20 mm ;
- 1.15% pour les granulats de taille maximale 10 mm ;
- 1.5% pour les mortiers ($D_{\max} = 5\text{mm}$).

MANGAT [58] a examiné l'effet du volume seul des agrégats grossiers, ce qui lui a obtenu une tendance similaire. En général, lorsqu'on augmente la teneur en grains de dimensions supérieures à 5mm dans le mélange, on obtient une forte diminution de l'ouvrabilité.

II.1.3.1.2 La longueur et le diamètre de fibres d'acier

Il est évident que plus les fibres ont un élancement L/d plus grand, plus elles ont tendance à s'enchevêtrer, c'est ce qui favorise la formation des oursins et par conséquent la perturbation de l'arrangement du squelette granulaire et la diminution de l'ouvrabilité du mélange.

Le chercheur EDINGTON a étudié le pilote de fibres d'acier les résultats étaient les suivants :

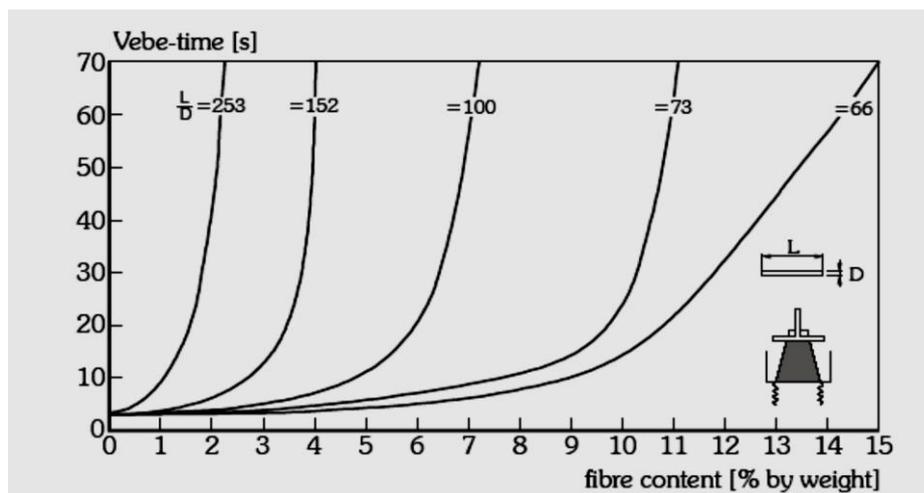


Figure (II-10) : Effet de l'élongation de fibre sur l'essai de VêBé d'un mortier renforcé de fibres [57].

Le rapport ou la longueur relative des fibres (l/d) est un paramètre de grande importance par son influence sur la maniabilité du béton.

II.1.3.1.3 Relation entre le rapport longueur/diamètre de la fibre et la maniabilité du BFM

Des études expérimentales antérieures, réalisées par SYNDER et LANKARD (1972), HUGHES et FATTUHI (1976), ont montré que le rapport L/d des fibres cylindriques joue un rôle central dans la maniabilité d'un BFM.

ROSSI [29], a rapporté cette conclusion :

« Pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand plus la maniabilité du BFM est mauvaise, et plus le risque formation de pelotes de fibres au sein de la matrice est grand ».

II.1.3.2 Notion de pourcentage critique des fibres liées à la maniabilité

Le pourcentage critique c'est le pourcentage limite admissible de fibres à introduire dans la matrice pour éviter les problèmes de mise en œuvre. Cette valeur critique dépend du rapport L/d de la fibre, de la proportion de granulats, mais aussi de la technologie de mise en œuvre. Ce pourcentage donne une idée de la capacité de la matrice à des variations de composition.

LIM et al [59], ont établi une relation empirique permettant d'assurer une bonne maniabilité.

$$V_{fmax} = \frac{B}{\frac{L}{d} - 16} \cdot 1,08 \cdot \left(1 - \frac{D}{32,5}\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

V_{fmax} : Volume maximal des fibres ;

D : Diamètre maximal des granulats ;

B : Constante qui dépend des constituants du béton ($B=1.80$ pour béton ordinaire) ;

$\frac{L}{d}$: Élanement des fibres.

Pour une meilleure ouvrabilité des bétons d'aciers, d'autres recherches limitent la teneur en fibres et leurs élanements par le respect de la relation suivante [60].

$$\frac{V_f \cdot L}{d} < 3 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

V_f : Pourcentage volumique des fibres ;

L et d : Sont respectivement la longueur et le diamètre des fibres.

II.1.4 Modification du squelette granulaire d'un BFM par rapport à un béton sans fibres

Comme évoqué précédemment, à constituants identiques, le squelette granulaire optimal d'un BFM peut être différent de celui du béton non fibré.

L'importance des modifications observées va dépendre de paramètres divers parmi lesquelles on peut citer : le type de fibre, le pourcentage de fibres, le rapport longueur de la fibre / diamètre du plus gros granulats (L_f / Φ_g).

De manière générale, on constate que, pour une maniabilité donnée, la quantité de liant, ainsi que le rapport (S/S+G) optimal du point de vue rhéologique augmentent avec le pourcentage de fibres et avec le rapport (L_f / Φ_g), lorsque celui-ci varie approximativement, entre 1 et 3.

Au contraire, lorsque (L_f / Φ_g) est inférieur à 1 ou supérieur à 3, seul intervient de manière significative le pourcentage de fibres.

Dans la figure II-11 sont présentés des résultats qui illustrent ce qui précède d'après [29].

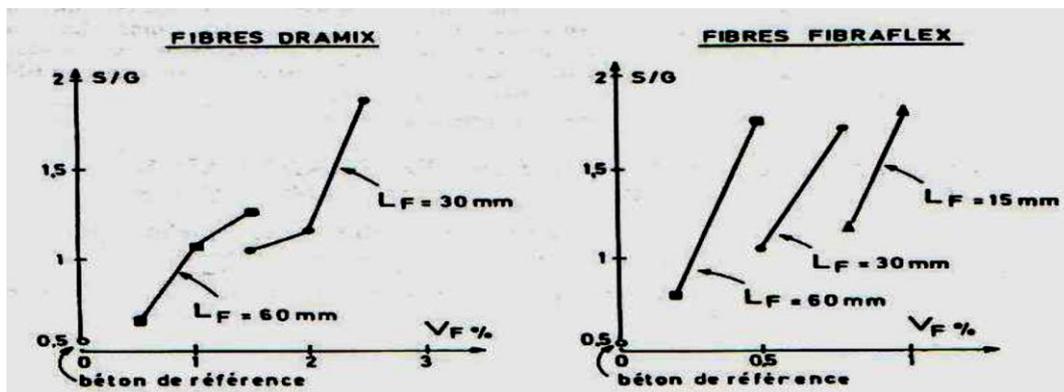


Figure (II-11) : Exemple de l'influence de la longueur des fibres et du pourcentage incorporé sur le rapport S/G du BFM [29].

On constate, au regard de ces figures, que l'influence sur le squelette granulaire est plus important dans le cas des fibres Fibraflex, qui sont des rubans de fonte amorphe de très faible épaisseur, que dans des fibres Dramix qui, elles sont des fibres cylindriques en acier tréfilé, munis de crochets à leur extrémité. Ceci illustre ce qu'est dit précédemment sur l'importance de la géométrie de la fibre.

Cette différence s'explique très bien quand on s'attache à comprendre l'origine physique de la modification nécessaire du squelette granulaire d'un BFM.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire, localement, c'est-à-dire autour de chaque fibre, par un " desserrement " du squelette granulaire, similaire à un effet de paroi. Ainsi, un certain volume des gros granulats va être remplacé par un certain volume de fibres, ce qui conduit à un " enrichissement " en éléments fins du squelette granulaire. Cette modification de l'empilement granulaire est schématisée dans la figure II-12 au travers d'une illustration pédagogique qui consiste à analyser le problème tridimensionnel de cet empilement par une analogie bidimensionnelle.

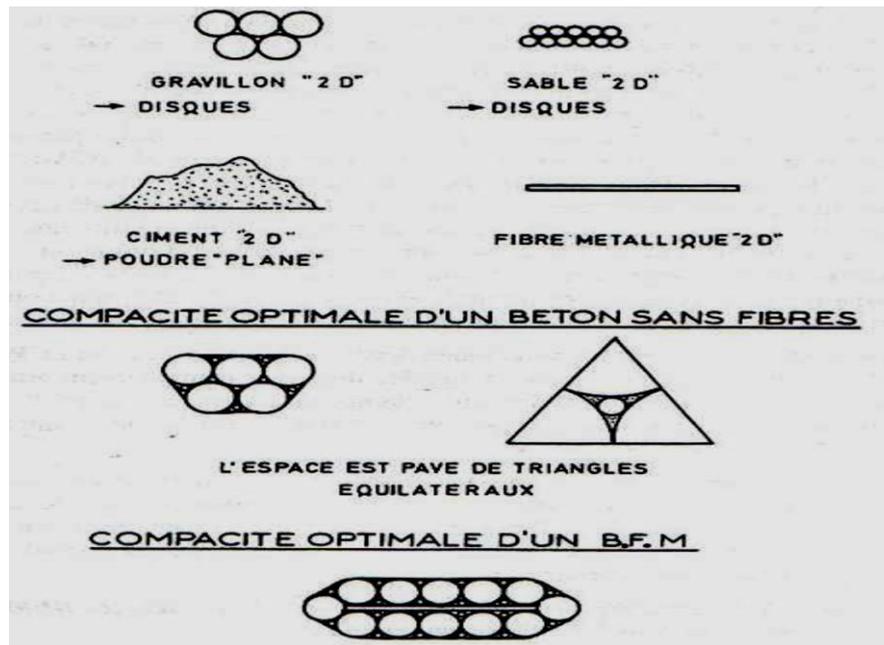


Figure (II-12) : Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM comparé à celui d'un béton non fibré [29].

Considérant ce qui précède, il est facile de comprendre qu'une fibre, ayant la forme d'un ruban, conduise, du fait de sa grande surface spécifique, à des effets de parois locaux plus importants qu'une fibre cylindrique, et donc perturbe plus l'empilement granulaire de la matrice.

II.1.5 Conclusion

- ❖ Les paramètres qui influencent les caractéristiques des bétons renforcés de fibres à l'état frais sont :
 - la géométrie des fibres,
 - le pourcentage en fibres,
 - le volume et la taille des granulats.
- ❖ L'élanement de fibre (l/d) est un paramètre de grande importance par son influence sur la maniabilité des bétons.
- ❖ Plus le volume et la taille d'agrégat grossier sont grands plus que l'interaction des fibres se produira.

CHAPITRE III :
VALORISATION DU SABLE DE DUNE EN GÉNIE
CIVIL

III. Valorisation du sable de dune en génie civil

III.1 Introduction

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes.

Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers. Mais l'utilisation de cette matière avec sa forme actuelle comme constituant principal de béton, n'apparaissait qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par GOIGNET .F [61].

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique par exemple, en génie civil, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental [62].

III.2 Intérêt de sable de dune

L'intérêt d'utilisation de tels agrégats se situe à deux niveaux : technique et économique.

III.2.1 Les aspects économiques

Les aspects ont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine dans le transport des matériaux, puisqu'il est partout disponible en quantité inépuisable. Par ailleurs, son extraction n'engendre pratiquement pas de frais supplémentaires et son mélange avec les autres matériaux sur chantier peut se faire facilement.

III.2.2 Les aspects techniques

- Le sable peut contribuer à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance.
- Il peut être utilisé pour diminuer la plasticité des matériaux de base.

III.3 Valorisation de sable de dune dans la formulation du béton

III.3.1 En Union Soviétique

Le béton de sable est connu depuis plus d'un siècle en CEI, son développement est du à l'absence des granulats dans certaines régions, ou les granulats doivent être transportés sur de très longues distances " 1000Km ou plus ".

En 1954 le professeur académicien REHBINDER et son équipe ont réalisées en Russie les premières expérimentations en laboratoire, suivies d'applications en usine sur des bétons de sable. L'idée est basée sur le broyage du mélange composé de ciment et du sable, et d'un agent de mouture sur actif. Un adjuvant réducteur est ajouté lors de malaxage. L'application de ces principes permet d'obtenir un béton de porosité aussi faible que possible, constitué de capillaires très fins et d'homogénéité maximale après mise en place.

Une étude est faite par MIRONVOK et STERYNE [63] sur des bétons de sable compact à l'aide de l'équipement à vibro-choc pour fabrication de structures.

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés, sur des échantillons $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, il a été constaté qu'avec des valeurs de E/C comprises entre 0.29 et 0.38 on obtient de hautes résistances (supérieurs à 50 MPA). De plus la résistance à la compression Rc28 semble augmenter avec la valeur de module de finesse.

III.3.2 En France

La pénurie de gros granulats alluvionnaires et la disponibilité de gros gisements de sable dans certaines régions de France, ont poussé les chercheurs à étudier un matériau fait de sable et de ciment pour remplacer le béton traditionnel dans certains domaines (parpaings. Dalle, briques, structures peu sollicitées, etc..).

C'est à partir des années 1978, qu'une véritable démarche a commencé à se structurer autour des bétons de sable, un projet national " SABLOCRETE " (association pour la promotion et le développement du béton de sable) est né dans les années 1980 en région aquitaine.

Des travaux d'expérimentation ont été menés par GUINEZ.R, GLUAIS.G, DELUDE.P [64]. Le but de ces recherches c'est de donner au maçon et entreprises du bâtiment un matériau hydraulique, à base de sable ayant des performances mécaniques modestes, d'autre part, des caractéristiques rhéologiques bien adaptées à une grande facilité de mise en œuvre, sans vibration avec un retrait limité.

Les principaux résultats des travaux effectués sont résumés dans le tableau III-1.

Tableau (III-1) : Résultats des essais [64].

Age du béton	2j	7j	28j
Retrait ($\mu\text{m/m}$)	40	160	495
Résistance en compression (MPa)	3,9	11	17,5
Résistance en traction (MPa)	1,1	2,5	4,1

III.3.3 En Algérie

L'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, est notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différents natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturelles et artificielles. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire [65].

Une étude est faite par M.BENMALEK.ML [66] sur le béton de sable de dune. Cette étude a montré qu'en exploitant les caractéristiques physico-chimiques, ce type de sable pourrait bien constituer le squelette d'un béton pour peu que sa formulation soit judicieusement étudiée.

La composition finale adoptée et les résultats obtenus sont :

Tableau (III-2) : Composition et résultats de caractéristiques importantes sur des éprouvettes (16x32) du béton de sable de dune.

	Sable de dune (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Fillers calcaires (kg/m ³)	Eau (l/m ³)
Dosage	1249	350	300	281
Rc28(Mpa)	20			
Module d'élasticité (Mpa)	21000			
Déformation maximale (µ/m)	2300			
Contrainte maximale (Mpa)	16,50			
Affaissement au cône (cm)	8,84			

Ces résultats ont permis de conclure la possibilité d'utilisation des structures faiblement sollicitées.

AZZOUZ. Hocine [67], l'étude de béton à base de sable de dune, montrent que les bétons où on a introduit le sable de dunes donnent des résistances inférieures à celle du béton confectionné avec le sable d'Oued au même âge.

Les différents types de sable utilisés :

SD1 : Sable de dune de la région de Lichana (BISKRA).

SD2 : Sable de dune de la région de Ain Bennaoui (BISKRA).

SO : Sable d'oued Djedaï de la région de Lioua.

Tableau (III-3) : Composition de béton étudié [67].

	SO	SD1	SD2
Equivalent de sable Es	2.17	1.36	1.22
Béton B01	100%	-	-
Béton B02	-	100%	-
Béton B03	-	-	100%

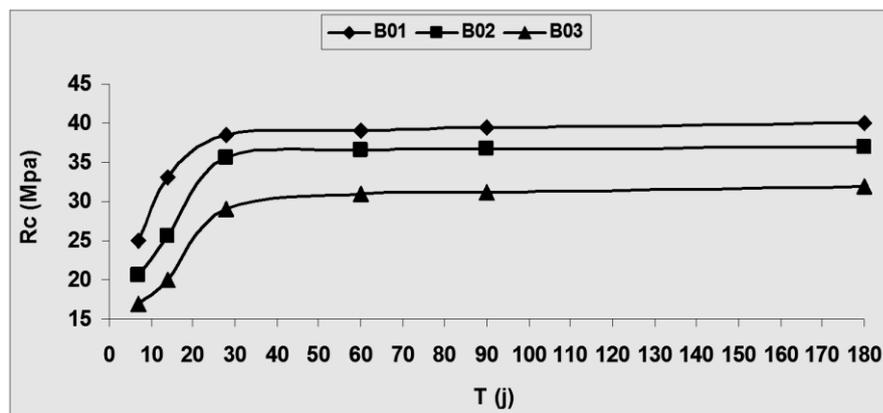


Figure (III-1) : Résistance à la compression des bétons (B01, B02 et B03) en fonction du temps et du type de sable 350 kg/m^3 .

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur la valorisation de sables des dunes dans le béton. Ces travaux ont permis de combler beaucoup de lacunes concernant les bétons à base de sable des dunes. La plupart de ces travaux ont été le résultat des recherches effectuées aux laboratoires (EVRNZA) de génie civil à l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

BENTATA Aissa [68], qui propose certaines compositions de béton avec sable de dune.

Les résultats de la résistance à la compression et à la traction sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau (III-4) : Les résultats de résistance à 28 jours.

	% de sable de dune	% de sable alluvionnaire	E/C	Rc28 (Mpa)	Rt28 (Mpa)
Béton A	-	100	0,52	31	2,5
Béton B	25	75	0,52	24	2,2
Béton C	50	50	0,52	27	2,6
Béton D	75	25	0,53	24	2,4
Béton E	100	-	0,55	24	2,5

L'étude semble que le béton ordinaire est toujours prépondérant par rapport aux autres bétons. Le béton à base de sable de dune présente une réduction de résistance à la compression allant jusqu'à 20%, et un retrait triple que celle du béton ordinaire.

BOUHNİK Brahim [69], qui propose certaines compositions de béton avec sable de dune est l'un de ses constituants.

Le sable de dune utilisé est celui de la région de Ain-baida (Ouargla) qui se caractérise par un module de finesse de 1,33 et un équivalent de sable de 97% (sable très propre), le ciment utilisé est un ciment résistant aux sulfates CPA CEM I 42.5 ES (CRS) de la cimenterie Algérienne.

Une série d'essais est exécutée sur les compositions suivantes :

Le dosage en ciment est constant (400 kg/m^3). Les résultats de résistance sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau (III-5) : Les résultats de résistance à 28 jours.

	% de sable de dune	% de sable de construction	% de flintkote	E/C	Rc28 (Mpa)	Rt28 (Mpa)
BSC	-	100	-	0,58	41,85	2,744
BSCD	50	50	-	0,55	44,14	3,054
BSD	100	-	-	0,53	43,02	3,230
BSCF	-	100	2	0,55	37,27	2,741
BSCDF	50	50	2	0,52	40,87	2,705
BSDF	100	-	2	0,50	41,63	2,740

L'auteur montre que la résistance est plus importante dans le béton à base de sable de dune (**BSD**) que celui composé d'un mélange des deux sables (**BSCD**) par rapport au béton témoin (**BSC**). Cela est dû aux causes suivantes :

- Le rapport E/C : est plus important dans le béton **BSC** par rapport au béton **BSCD** et **BSD**.
- Le rapport G/S : plus le rapport G/S augmente, plus la résistance augmente à son tour.

MANI Mohamed [70], montre que l'incorporation des fibres métalliques de forme ondulé (F1) au sein de béton de sable donne, effectivement une amélioration de la résistance à la flexion de béton de sable renforcé par les fibres métalliques par rapport au béton témoin.

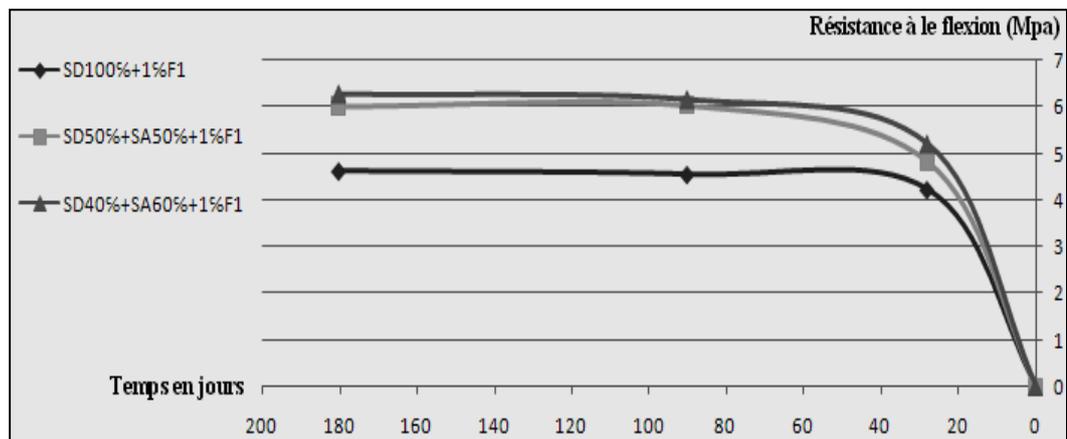


Figure (III-2) : Résistance à la flexion de béton de sable fibré en fonction du % de sable et en fonction du temps.

III.4 Domaines d'utilisation des bétons de sable

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation du béton de sable, tant techniquement qu'économiquement [71].

Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du béton de sable en font le matériau convenable :

III.4.1 En raison de sa fluidité

- A la fabrication des pieux forés ;
- A la réalisation de dallages autonivelants ;
- Au renforcement de structure par projection.

III.4.2 En raison de sa faible tendance à la ségrégation

- A une facile mise en œuvre sous l'eau ;
- A la réparation de fondations ;
- Au comblement de cavités.

III.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique l'intérêt de sable de dune dans la formulation de béton. Malgré l'insuffisance des résultats de différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans certaines applications.

En revanche, le béton de sable semble avoir un grand avenir dans certains domaines, les avantages techniques et économiques des bétons en laissent prévoir un développement important pour le futur.

PARTIE 2
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

***CHAPITRE IV : CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUES
DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET LEURS ESSAIS***

***CHAPITRE V : ÉTUDE DU BÉTON A BASE DE SABLE DE DUNE
CORRIGÉ RENFORCÉ PAR DES FIBRES MÉTALLIQUES***

CHAPITRE IV :
CARACTÉRISATION PHYSICO-MÉCANIQUES DES
MATÉRIAUX UTILISÉS ET LEURS ESSAIS

IV. Caractérisation physico-mécaniques des matériaux utilisés et leurs essais

IV.1 Introduction

Le béton est un matériau artificiel obtenu par un mélange d'un liant (généralement du ciment), d'eau, de granulats (sable et graviers), et éventuellement d'adjuvant, le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région de Laghouat.

Dans le présent chapitre nous avons étudié quelques caractéristiques des matériaux de base de notre composite à savoir le gravier, sable, ciment, adjuvant, fibres métalliques et l'acier d'armature.

- Un gravier de deux fractions (3/8) et (8/15) ramené d'une carrière se trouvant à la sortie nord de la ville de Laghouat ;
- Un sable de dune ramené de la région Nord de la ville de Laghouat (HAMDA), il est noté **SD** ;
- Un sable alluvionnaire ramené d'oued M'zi (région de Laghouat), il est noté **SA** ;
- Un sable mélange (dunaire-alluvionnaire) préparé à partir de la règle d'Abrams ; en corrigeant la courbe granulométrique du sable de dune par l'ajout de sable alluvionnaire, ce sable est noté **SC** ;
- Ciment CPJ-CEMII 42.5 de l'Usine Oggaz (MASCARA) ;
- Eau de gâchage : c'est l'eau potable ;
- Un Adjuvant provenant de société GRANITEX Oued Smar (Wilaya d'Alger) ;
- Les fibres métalliques sont des déchets récupérés aux chantiers (chutes de fil d'attache) ;
- L'acier d'armature utilisé c'est l'acier disponible dans les marchés.

La plus part des essais d'identification sont réalisés au niveau de laboratoire de Génie Civil de l'Université Amar Telidji de Laghouat. Chaque résultat représente la moyenne d'au moins trois essais.

IV.2 Gravier

Le gravier utilisé provient d'une roche calcaire de la région de Laghouat. Pour la formulation de notre béton on a choisi deux fractions, 3/8 et la fraction 8/15. Le gravier est le constituant le plus important des bétons et sa qualité est, donc, un facteur déterminant pour la qualité du béton résultant.

IV.2.1 Masses volumiques

Les masses volumiques apparentes et spécifiques des granulats sont calculés d'après la norme française NF P18-555 [72].

IV.2.1.1 Masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent du corps. C'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient, elle est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

γ_{app} : Masse volumique apparente ;

M_1 : Masse de matériau ;

M_2 : Masse de la mesure vide ;

V : Volume total du matériau.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV-1.

IV.2.1.2 Masse spécifique

On entend par la masse spécifique la masse d'un corps par unité de volume total en ayant déduit les vides entre les grains.

La masse spécifique du gravier peut être calculée par la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

γ_s : Masse spécifique ;

M : Masse du corps ;

$V = V_2 - V_1$: Volume absolu.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV-1.

Tableau (IV-1) : Masses volumiques apparentes et spécifiques des graviers utilisés.

Classe de Gravier	Gravier 3/8	Gravier 8/15
$\gamma_{app} (kg/m^3)$	1358,50	1480,90
$\gamma_s (kg/m^3)$	2666,67	2666,67

IV.2.2 Capacité d'absorption d'eau du gravier

C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Elle est déterminée en mesurant l'augmentation de masse d'un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l'eau pendant 24 heures et séché superficiellement. Le rapport entre l'augmentation de la masse et la masse de l'échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l'absorption A_b , qui ne doit pas dépasser les 5 % selon la norme française NF P 18-555 [72], soit :

$$A_b(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

A_b : Coefficient d'absorption d'eau ;

M_s : Masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;

M_a : Masse de l'échantillon après imbibition dans l'eau pendant 24h à T=20°C.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV-2.

Tableau (IV-2) : Coefficient d'absorption d'eau des graviers utilisés.

Classe de Gravier	Gravier 3/8	Gravier 8/15
$A_b(\%)$	1,12	1,81

On remarque que le gravier utilisé a une capacité d'absorption d'eau acceptable $A_b < 2,5\%$ [72].

IV.2.3 Propreté superficielle du gravier

D'après la norme française NF P 18-591 [73], l'essai consiste à déterminer la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm par élimination des poussières et des particules argileuses inférieures à 0,5 mm. L'élimination est réalisée par lavage de l'échantillon sur le tamis correspondant.

Le rapport du passant à 0,5 mm au poids total de l'échantillon représente la propreté superficielle des gravillons :

$$P(\%) = \frac{m}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{IV.4})$$

Tableau (IV-3) : Propreté superficielle du gravier.

Classe de Gravier	Gravier 3/8	Gravier 8/15
$P(\%)$	2,4	0,73

Les deux fractions ont des degrés de propreté inférieurs à 5% donc elles sont propres et acceptables pour la formulation d'un béton.

IV.2.4 Propriété mécanique

La première propriété mécanique des granulats est la dureté qui est définie comme étant la résistance d'un échantillon de roche à se briser sous un choc.

IV.2.4.1 Los Angeles

C'est un essai qui estime la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement réciproques. Cette résistance est mesurée par le coefficient Los Angeles L_A , rapport de la masse des fragments passant au tamis de 1,6 mm mesuré en fin d'essai à la masse de l'échantillon [74].

$$L_A(\%) = \left(\frac{\text{Passant au tamis 1,6 mm}}{\text{Masse de l'échantillon}} \right) \cdot 100 \quad (\text{IV.5})$$

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV-4.

Tableau (IV-4) : Coefficient de Los Angeles des graviers utilisés.

Classe de Gravier	Gravier 3/8	Gravier 8/15
$L_A(\%)$	28,76	28,76

La valeur de los Angeles pour le gravier utilisé $L_A < 40\%$, nous pouvons conclure que ces graviers peuvent être utilisés pour la confection du béton [43].

IV.2.5 Analyse granulométrique du gravier

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm.

Cet essai est réalisé suivant la norme NF P 18-560 [75]. L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D. Où D la plus grande dimension des granulats à analyser.

On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique du gravier **G8/15** et **G3/8** sont donnés respectivement dans le tableau IV-5 et IV-6, Leurs courbes granulométriques sont montrées sur les figures IV-1 et IV-2.

Tableau (IV-5) : Analyse granulométrique par tamisage de gravier G8/15.

Echantillon : gravier 8/15				Date : 25/05/2011		
Température = 22 °C				Référence dossier : NFP 18-553		
Masse de l'échantillon = 6000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau 8/15	
20	0	0	0	100	100	100
16	96,1	96,1	1,602	98,40	85	99
12,5	2675,3	2771,4	46,190	53,81	33	66
10	2441,3	5212,7	86,878	13,12	14	38
8	568,1	5780,8	96,347	3,65	1	15
6,3	196,7	5977,5	99,625	0,38	0,33	5
< 6,3	19,5	5997	99,950	0,05	0	2

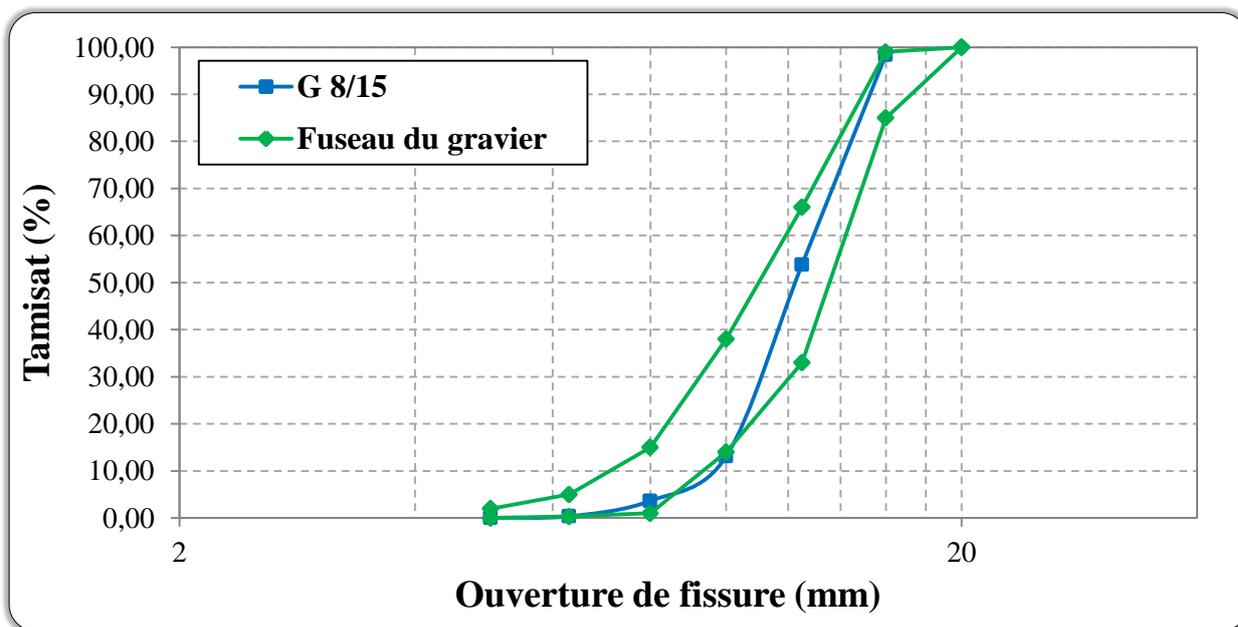


Figure (IV-1) : Courbe granulométrique du gravier G8/15.

Tableau (IV-6) : Analyse granulométrique par tamisage de gravier **G3/8**.

Echantillon : gravier 3/8				Date : 25/05/2011		
Température = 22 °C				Référence dossier : NFP 18-553		
Masse de l'échantillon = 3000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau 3/8	
10	-	-	-	100	100	-
8	97,3	97,3	3,24	96,76	85	99
6,3	728,7	826	27,53	72,47	55,5	80,3
5	896,3	1722,3	57,41	42,59	26,6	57,5
4	1005,3	2727,6	90,92	9,08	3,4	18,8
2,5	238,6	2966,2	98,87	1,13	1	15
< 2,5	32,5	2998,7	99,96	0,04	0	2

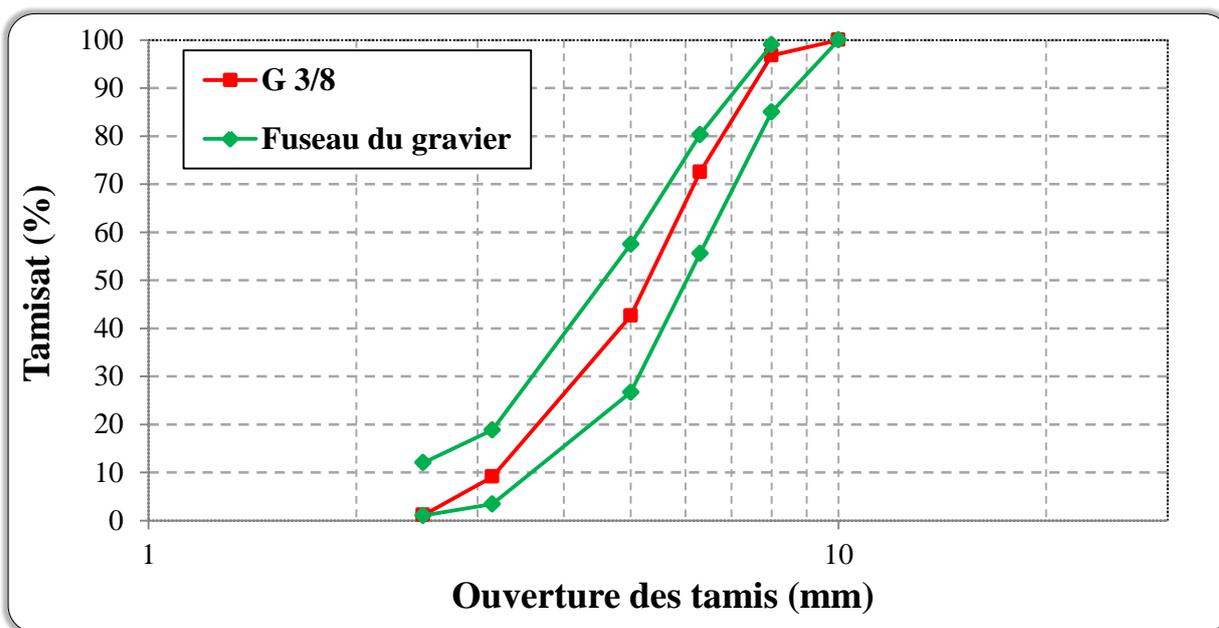


Figure (IV-2) : Courbe granulométrique du gravier **G3/8**.

IV.3 Sable

Dans cette étude on à utiliser deux types de sable:

- Un sable de dune provenant de la région Nord de la ville de Laghouat (HAMDA).
- Un sable alluvionnaire a été extrait de l'oued M'zi (région de Laghouat).

IV.3.1 Masses volumiques

Les résultats des essais de la masse volumique apparente et la masse volumique spécifique des différents sables sont :

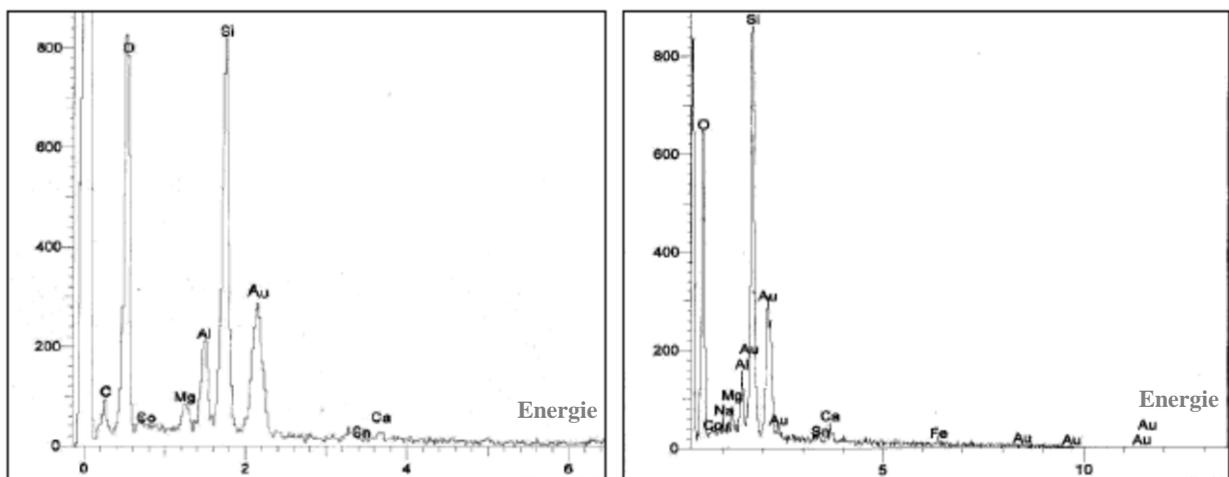
Tableau (IV-7) : Masses volumiques apparentes et spécifiques des sables utilisés.

Type de Sable	Sable de dune SD	Sable alluvionnaire SA
$\gamma_{app} (kg/m^3)$	1480,90	1549,76
$\gamma_s (kg/m^3)$	2666,67	2500,00

IV.3.2 Analyse chimique

L'analyse chimique des deux sables, dunaire et alluvionnaire, fait par [76], a été menée avec le microscope électronique à balayage. Elle révèle la présence d'atomes de Si et O, ce qui correspond à la présence de l'espèce SiO_2 (silice). De plus le pourcentage atomique important de Si nous indique que SiO_2 est l'espèce prépondérante. Les autres valeurs de pourcentages atomiques, nous permettent d'établir que les deux sables contiennent aussi quelques traces, en comparaison avec SiO_2 , d'espèces calciques et magnésiennes, voir la figure IV-3.

Notons que les granulats siliceux sont ceux qui donnent les meilleures performances.



(a) – Sable alluvionnaire SA –

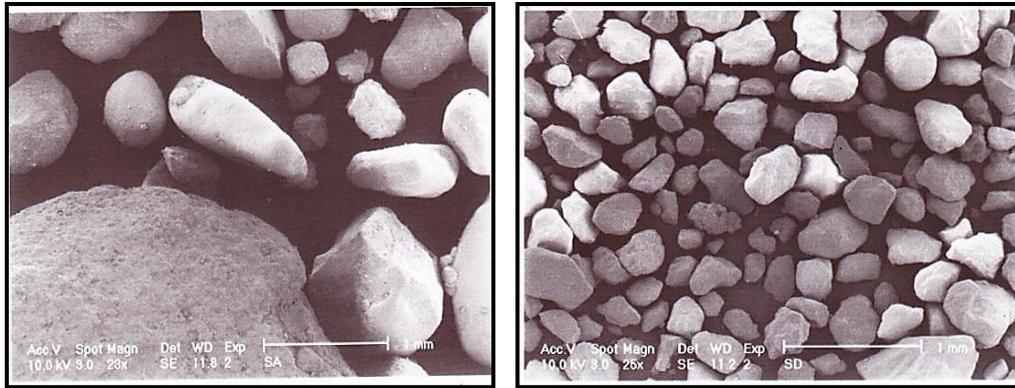
(b) – Sable de dune SD –

Figure (IV-3) : Analyse chimique des deux sables [76].

On remarque que les deux sables (SD et SA) sont très pur et à haute teneur en silice SiO_2 . Leur caractéristique chimique a montré que ces sables pourraient donner des résistances acceptables grâce à leur composition chimique siliceuse (la nature siliceuse donne souvent de meilleures performances).

IV.3.3 Observation à grande échelle des deux sables

Les photos présentées à grande échelle par la figure IV-4 montrent les deux sables (dunaire et alluvionnaire) visualisés par microscope électronique à balayage (MEB).



(a) – Sable alluvionnaire SA –

(b) – Sable de dune SD –

Figure (IV-4) : Observations des grains de sable au MEB [76].

La majorité des grains semblent avoir des formes arrondies avec une faible angularité.

Les grains du sable alluvionnaire paraissent plus arrondis et plus gros que ceux du sable dunaire.

IV.3.4 Capacité d’absorption d’eau du sable

C’est une mesure des pores accessibles à l’eau. Elle est déterminée en mesurant l’augmentation de masse d’un échantillon séché au four après avoir été immergé dans l’eau pendant 24 heures et séché superficiellement [43].

Le rapport entre l’augmentation de la masse et la masse de l’échantillon sec, exprimé en pourcentage, est défini comme étant l’absorption A_b , qui ne doit pas dépasser les 5 % selon la norme française [72], soit :

$$A_b(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{(IV.6)}$$

M_s : Masse de l’échantillon séché à l’étuve à 105 °C jusqu’à masse constante ;

M_a : Masse de l’échantillon après imbibition dans l’eau pendant 24h à T=20°C.

Les résultats des essais sont résumés dans le tableau IV-8.

Tableau (IV-8) : Coefficient d’absorption d’eau des sables utilisés.

Type de Sable	Sable de dune SD	Sable alluvionnaire SA
A_b (%)	0,50	1,20

IV.3.5 Essai d'équivalent de sable

L'équivalent de sable E_S indique le degré de pollution des éléments d'un sol. Il a pour but de mesurer la propreté et de déterminer le pourcentage des poussières nuisibles dans le matériau. L'essai a été fait conformément à la norme française [77]. Deux indices sont déterminés :

➤ Pour l'équivalent de sable visuel : $E_{SV}(\%) = \frac{h'_2}{h_1} \times 100$ (IV.7)

➤ Pour l'équivalent de sable à piston : $E_{SP}(\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100$ (IV.8)

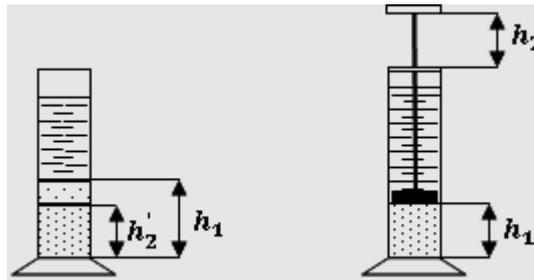


Figure (IV-5) : Essai Equivalant de sable.

Les valeurs moyennes trouvées sont :

Tableau (IV-9) : Equivalent de sable utilisé.

Type de Sable	Sable de dune	Sable alluvionnaire
E_{sv} à vue (%)	93,01	90,12
E_{sp} à piston (%)	91,43	88,40

D'après ces valeurs on constate que le sable de dunes est relativement plus propre que le sable alluvionnaire. Mais les deux sables sont bons (très propres) selon [6].

IV.3.6 Analyse granulométrique

Pour les deux types de sable, les analyses granulométriques effectuées sont données dans les tableaux IV-10, IV-11 et sont représentées dans les figures IV-6, IV-7.

IV.3.6.1 Module de finesse

Les sables sont caractérisés par le module de finesse M_f . Le module de finesse d'un granulat est égal au $1/100^\circ$ de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur les tamis de série suivant (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm). Le module de finesse surtout utilisé pour les sables permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

$$M_f = \frac{\sum \% \text{ refus(cumulé)}}{100} \tag{IV.9}$$

Tableau (IV-10) : Analyse granulométrique par tamisage du sable de dune SD.

Echantillon : sable SD				Date : 25/05/2011		
Référence dossier : NFP 18-553				Température = 22 °C		
Masse de l'échantillon = 2000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau de sable	
5	0	0	0	100	100	100
4	0	0	0	100	100	80
2,5	0	0	0	100	90	80
1,25	0	0	0	100	90	50
0,63	39,4	39,4	1,97	98,03	70	30
0,315	498,7	538,1	26,90	73,09	40	15
0,16	1352,4	1890,5	94,52	5,47	20	5
0,08	98,3	1988,8	99,44	0,56	10	0
< 0,08	8,7	1997,5	99,87	0,12	0	0

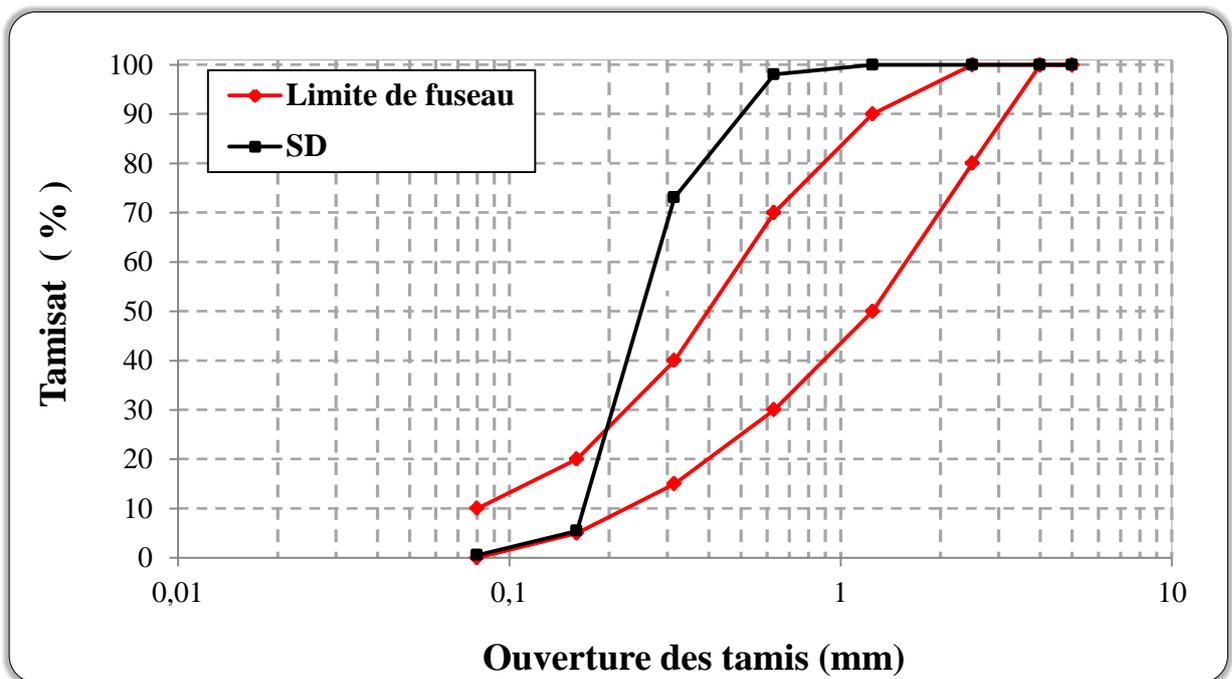


Figure (IV-6) : Analyse granulométrique du sable de dune SD.

Tableau (IV-11) : Analyse granulométrique par tamisage du sable alluvionnaire SA.

Echantillon : Sable Alluvionnaire SA				Date : 25/05/2011		
Référence dossier : NFP 18-553				Température = 22 °C		
Masse de l'échantillon = 2000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau de sable	
5	0	0	0	100	100	100
4	10,1	10,1	0,505	99,49	100	80
2,5	46,3	56,4	2,82	97,18	90	80
1,25	127,2	183,6	9,18	90,82	90	50
0,63	1319,6	1503,2	75,16	24,84	70	30
0,315	345,5	1848,7	92,43	7,565	40	15
0,16	134,7	1983,4	99,17	0,83	20	5
0,08	11,4	1994,8	99,74	0,26	10	0
< 0,08	3,6	1998,4	99,92	0,08	0	0

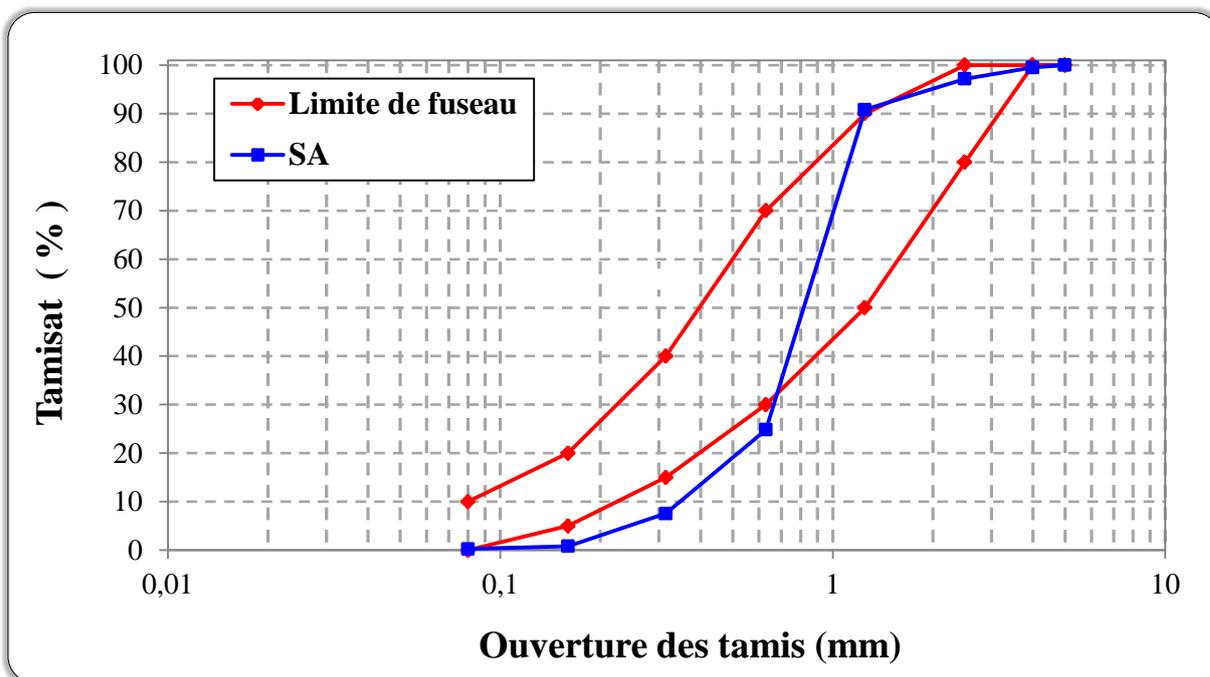


Figure (IV-7) : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire SA.

- Module de finesse du sable de dune (SD) est : $M_{f1} = 1,23$
- Module de finesse du sable alluvionnaire (SA) est : $M_{f2} = 2,79$.

IV.3.7 Correction du sable de dune

Dans notre étude nous allons utiliser un mélange de sable (sable alluvionnaire + sable de dune). Pour les sables on peut définir trois fuseaux A, B, C, dans lesquels la courbe granulométrique de l'échantillon analysé doit se trouver. Si elle s'en écarte il convient alors de modifier l'étalement du sable, en lui apportant les grains manquants [43].

- Le fuseau **A** est le fuseau préférentiel : $(2,20 \leq M_f \leq 2,80)$
- Le fuseau **B** correspond à un sable un peu trop fin : $(1,80 \leq M_f \leq 2,20)$
- Le fuseau **C** correspond à un sable un peu trop grossier : $(2,80 \leq M_f \leq 3,20)$

La figure suivante montre les différents fuseaux qui sont les fuseaux préférentiels du sable.

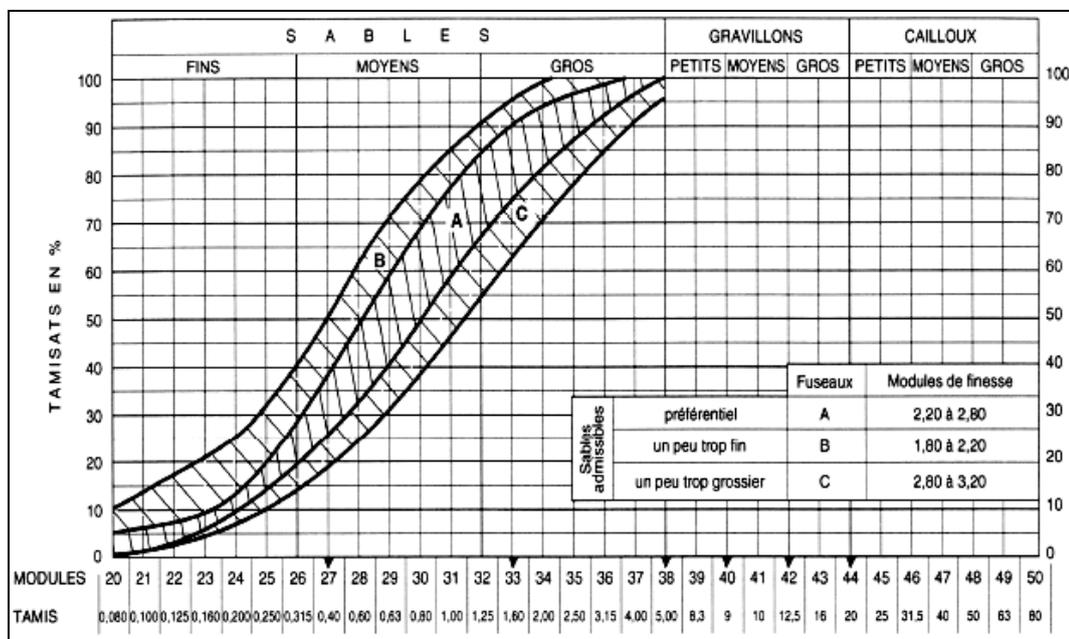


Figure (IV-8) : Fuseaux préférentiel du béton [43].

Pour un bon sable à béton le module de finesse qui doit être de l'ordre de 2,2 à 2,8 fuseaux (A).

On propose alors un mélange avec un $M_f = 2,35$.

La méthode de correction des sables peut se faire par la méthode théorique (règle d'Abrams) [6].

On prend le sable de dune avec un $M_{f1} = 1,23$ qu'on va corriger avec le sable alluvionnaire dont le $M_{f2} = 2,79$ pour avoir un mélange dont le module de finesse sera égal à $M_f = 2,35$.

Les proportions des deux sables devront être les suivantes :

Proportion du sable de dune : $SD = \frac{(Mf - Mf2)}{(Mf1 - Mf2)} = 30 \%$ (IV.10)

Proportion du sable alluvionnaire : $SA = \frac{(Mf1 - Mf)}{(Mf1 - Mf2)} = 70 \%$ (IV.11)

A partir de ces résultats, en utilisant un mélange de sable SD = 30 % et SA = 70 % on obtient un module de finesse $M_{f3} = 2,33$.

Avec ce mélange corrigé on trouve la masse volumique apparente $\gamma_{app} = 1529 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, et la masse volumique spécifique $\gamma_s = 2580,6 \text{ (kg/m}^3\text{)}$.

Tableau (IV-12) : Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé SC.

Echantillon : Sable Corrigé SC				Date : 25/05/2011		
Référence dossier : NFP 18-553				Température = 22 °C		
Masse de l'échantillon = 2000g						
Diamètre des Tamis (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulé en (g)	Refus cumulé en (%)	Tamisât en (%)	Fuseau de sable	
5	0	0	0	100	100	100
4	8,3	8,3	0,41	99,58	100	80
2,5	38,9	47,2	2,36	97,64	90	80
1,25	89,2	136,4	6,82	93,18	90	50
0,63	798,4	934,8	46,74	53,26	70	30
0,315	669,9	1604,7	80,23	19,76	40	15
0,16	327,7	1932,4	96,62	3,38	20	5
0,08	58,1	1990,5	99,52	0,47	10	0
< 0,08	8,1	1998,6	99,93	0,07	0	0

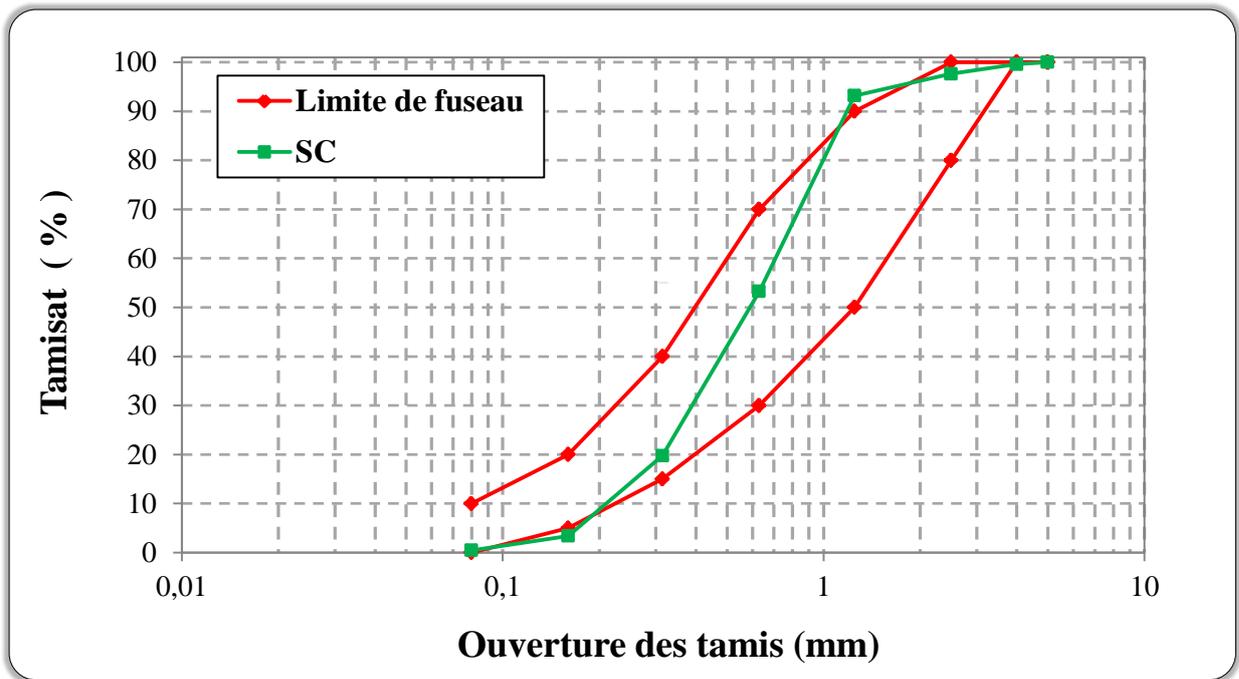


Figure (IV-9) : Analyse granulométrique du sable corrigé SC.

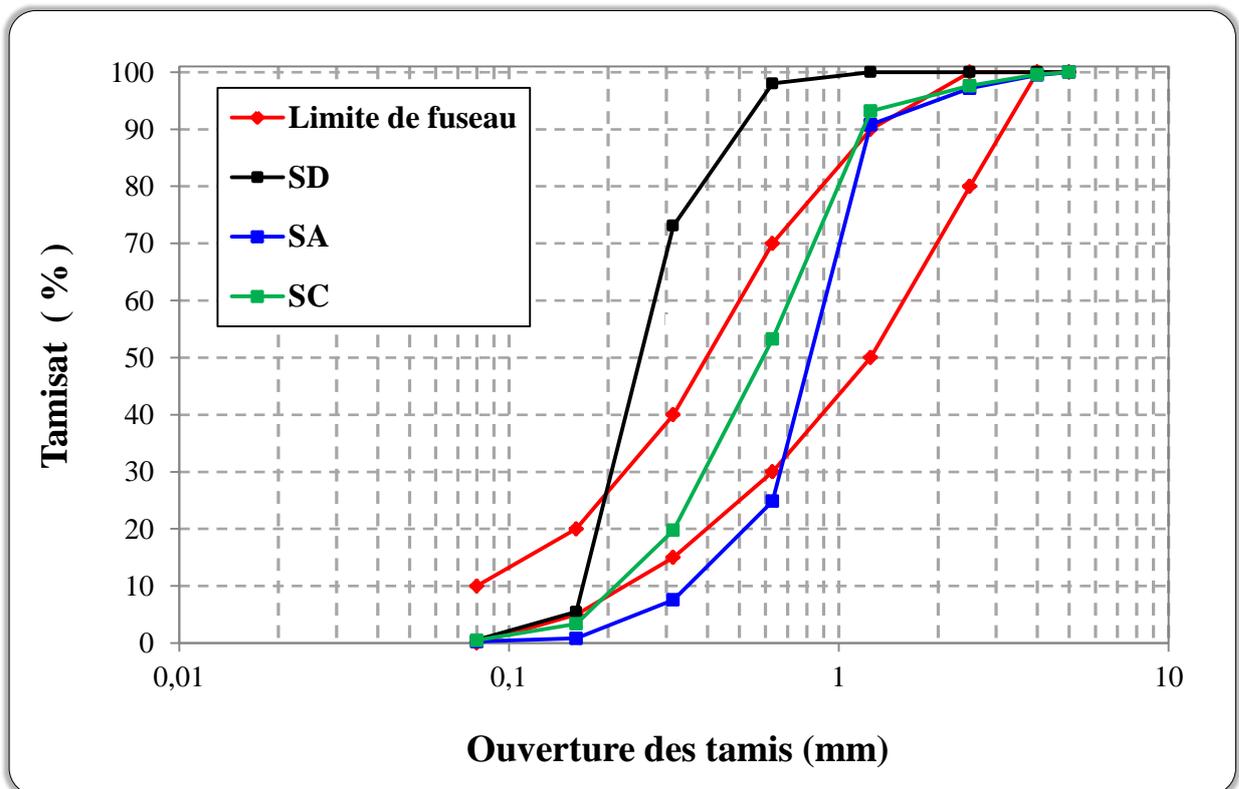


Figure (IV-10) : Courbes granulométriques des différents sables.

Pour les sables utilisés dans notre étude on a trouvé le module de finesse

- Pour sable alluvionnaire $M_{f2} = 2,79$.
- Pour sable de dune $M_{f1} = 1,23$.
- Pour sable corrigé $M_{f3} = 2,33$.

D'après les valeurs du module de finesse, nous pouvons dire que le sable de dune (SD) est un sable très fin, le sable alluvionnaire (SA) est un sable grossier et le sable corrigé (SC) est un sable normal. La granulométrie du sable de dune est serrée avec absence d'élément entre 0,63-5mm, par contre celles des deux sables sont étalées. La granulométrie du sable corrigé paraît la seule qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons courants.

IV.4 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium [6].

IV.4.1 Composition

Le ciment que nous avons utilisé pour la confection des bétons est un ciment Portland composé (MATINE) CPJ-CEM II /A 42,5 R ; fabriqué par l'Usine Oggaz (MASCARA).

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 [78].

IV.4.2 Analyses et caractérisation

Les analyses chimiques et minéralogiques du ciment sont résumées dans le tableau IV-13 :

Tableau (IV-13) : Analyses chimiques de ciment.

Analyses chimiques	
Perte au feu (%)	8,00 - 10,00
Résidus insolubles (%)	0,7 - 1,5
Teneur en sulfates SO ₃ (%)	2,10 - 2,50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,00 - 1,30
Teneur en chlorures (%)	0,01 - 0,03
Composition hypothétique du clinker	
Silicates tricalciques C ₃ S (%)	55,00 - 62,00
Silicates bicalciques C ₂ S (%)	13,00 - 22,00
Aluminates tricalciques C ₃ A (%)	6,50 - 8,20
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%)	10,00 - 13,00

IV.4.2.1 Consistance normale

L'essai de consistance permet de déterminer le pourcentage d'eau requis pour la fabrication d'une pâte de ciment de consistance normale. La pâte est dite de consistance normale lorsque la sonde de 10 mm de diamètre de l'appareil de Vicat s'enfonce à une profondeur de 10 ± 1 mm en 30 secondes sous l'effet d'une charge totale de 300 g, la teneur en eau est exprimée en pourcentage de masse de ciment [79].

IV.4.2.2 La finesse de mouture (finesse de Blaine)

L'essai a pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre.

La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées décrites, la surface est proportionnelle à \sqrt{t} [80].

La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S = K \frac{\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\varphi (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

K : Constante de l'appareil ;

t : Le temps mesuré en seconde ;

e : Porosité de ciment ;

φ : La masse volumique du ciment exprimée en (g/cm³) ;

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai.

IV.4.2.3 Masse volumique absolue

Le principe de la mesure consiste à mesurer le déplacement de niveau d'un liquide inerte vis-à-vis du ciment contenu dans un récipient lorsqu'on y introduit une masse donnée du ciment. L'appareil utilisé est appelé densimètre le Châtelier. Les pesées s'effectuent avec une balance de grande précision (de l'ordre de 0,001 gramme) [43].

La masse volumique absolue du ciment ρ_s se déduit à partir de l'expression suivante :

$$\rho_s = \frac{\text{Masse du ciment}}{\text{Volume déplacé}} \quad (\text{IV.13})$$

IV.4.2.4 Essai de prise

Il est nécessaire de connaître le début et fin de prise des pâtes de ciment (des liants hydrauliques) afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés [43]. Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P15-473 [79].

IV.4.2.5 Essai mécanique

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression exprimées en MPa à 28 jours, cette résistance est mesurée sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm en mortier 1/3 (une partie de ciment pour trois parties de sable), conformément à la norme NF EN196-1 [81].

Les résultats de l'ensemble des expérimentations sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau (IV-14) : Propriétés physiques et mécaniques du ciment.

Propriétés physiques	
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25,5 - 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine en cm^2/g	4 300 - 4 800
Masse volumique absolue en kg/m^3	3034
Masse volumique apparente en kg/m^3	1410
Temps de prise	
Début de prise (min)	160 - 209
Fin de prise (min)	205 - 270
Résistances mécaniques	
R_{c28} (MPa)	$\geq 42,5$
R_{t28} (MPa)	4,3

IV.5 Eau de gâchage

L'eau présente dans le béton joue deux fonctions principales : Elle lui confère sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation du ciment. L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable du réseau public de la ville de Laghouat, cette eau joue un rôle très important dans :

- L'hydratation du ciment ;
- Au mouillage des granulats (car la pâte de ciment colle mal à des granulats secs) ;
- Le malaxage et la mise en œuvre (améliore la maniabilité du béton).

L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire traitement des eaux de l'université de Laghouat. Elle montre que La potabilité chimiques est de bonne à passable,

Les détails de l'analyse chimique sont regroupés dans [Annexe 1].

IV.6 Adjuvant

Les adjuvants sont des produits qui, ajoutés à moins de 5% du poids du ciment, au moment du malaxage des mortiers et des bétons. Ils améliorent certaines de leurs propriétés.

Dans cette étude nous avons utilisé un seul type d'adjuvant provenant de GRANITEX Oued Smar (Wilaya d'Alger). L'adjuvant est un super plastifiant nommé **MEDAFLOW 30**.

Ce produit est un haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons, il est compatible avec tous les types de ciments. D'après la fiche de qualité [82], les caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau (IV-15) : Caractéristiques du super plastifiant MEDAFLOW 30.

Forme	Couleur	pH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Violet foncé	6 - 6,5	1,07 ± 0,01	≤ 1g/l	30%

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur le béton frais :

- L'obtention d'un rapport E/C très faible ;
- L'amélioration considérable de la fluidité ;
- Une très bonne maniabilité ;
- Un long maintien d'ouvrabilité ;
- D'éviter la ségrégation ;
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

Sur le béton durci :

- D'augmenter la résistance mécanique à jeune âge et long terme ;
- De diminuer la porosité ;
- D'augmenter la durabilité ;
- De diminuer le retrait et le risque de fissuration.

IV.7 Fibres

Le rôle des fibres, dans une matrice fragile, est le renforcement et la couture de la matrice après la fissuration, donc elles doivent posséder des caractéristiques satisfaisantes. D'autre part les fibres doivent être inertes dans le milieu cimentaire.

Les fibres utilisées doivent être avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice. Elles doivent conserver leurs propriétés dans le temps et être compatibles.

Les fibres utilisées sont locales et proviennent de la récupération. Elles sont issues des déchets aux chantiers "chutes de fil d'attaches". Elles ont une forme géométrique droite et lisse, cette idée contribue d'une part à la protection de l'environnement par la diminution du volume des déchets et d'autre part à la réduction du coût du béton de fibres tout en respectant les performances mécaniques du béton.

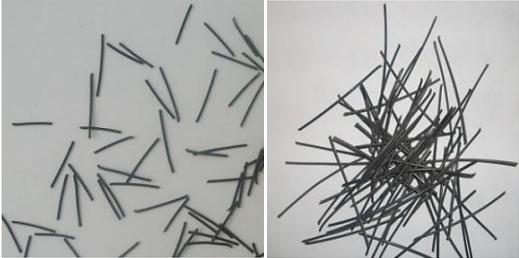
IV.7.1 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres

Les essais effectués pour caractériser les fibres métalliques ont été réalisés au laboratoire de Génie Civil de Laghouat.

- Pour la détermination de la résistance à la traction des fibres utilisées, nous avons fait des essais sur des échantillons de 15 cm de longueur.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau (IV-16) : Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées.

Caractéristiques		Photo (IV-1) : Les fibres utilisées	
Masse volumique absolue	7800 kg/m ³		
Charge de rupture à la traction	603,34 N		
Allongement à la rupture	2,96 %		
Géométrie de fibres utilisées	Ø _f = 1,20 mm L _f = 20 et 50 mm		

IV.8 Acier d'armature

Les aciers utilisés pour le ferrailage des poutres ont les caractéristiques suivantes [83]:

- ✓ Les ronds lisses FeE24 $\longrightarrow f_e = 215 \text{ MPa} \longrightarrow f_{su} = 187 \text{ MPa}$. Pour les étriers (armatures transversales).

Avec :

$$f_{su} = \frac{f_e}{\gamma_s} : \text{est la valeur de calcul de la contrainte de l'acier.}$$

γ_s : est le coefficient de sécurité ($\gamma_s = 1.15$ cas courants).

- ✓ Les hautes adhérences FeE40 $\longrightarrow f_e = 400 \text{ MPa} \longrightarrow f_{su} = 348 \text{ MPa}$. Pour les armatures longitudinales de traction et de compression.

IV.9 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre traite les caractéristiques des matériaux de bases utilisés dans l'étude expérimentale de notre recherche, les conclusions qu'on peut tirer de cette caractérisation sont :

- ❖ Le gravier utilisé est un gravier concassé de la région de LAGHOUAT, d'origines calcaires compactes et dures $L_A < 40$, avec un degré d'impureté est acceptable. Les deux fractions de gravier **3/8** et **8/15** ont une granulométrie continue avec une courbe un peu serrée pour la fraction **8/15**.
- ❖ Le coefficient d'absorption d'eau pour les deux fractions de graviers est valable $A_b < 5\%$.
- ❖ Le sable alluvionnaire **SA** d'oued M'zi, est caractérisé par une granulométrie étalée qui s'inscrit dans le fuseau recommandé pour les bétons ordinaires avec un taux d'absorption d'eau faible ; l'autre sable, c'est le sable de dune **SD** de la région HAMDA, qui est caractérisé par une granulométrie serrée situé hors du fuseau recommandé de sable, avec un taux d'absorption d'eau relativement faible.
- ❖ Les deux sables (**SD**, **SA**) utilisées, sont des matériaux très propres avec un équivalent de sable (E_{sv} et E_{sp}) supérieures de **80 %**, acceptable pour la confection des bétons de haute qualité.
- ❖ D'après l'analyse chimique du sable de dune et le sable alluvionnaire on constate que la silice (**SiO₂**) c'est l'élément le plus important dans les deux sables.
- ❖ Le ciment utilisé, c'est un ciment portland CPJ 42.5 avec une surface spécifique moyenne, et de prise satisfaisante aux spécifications des ciments courants.
- ❖ L'eau utilisée est une eau potable du robinet. Elle convient pour la confection du béton à condition qu'elle remplit toutes les prescriptions des normes NF P 18-303 [84].
- ❖ L'adjuvant que nous avons utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau appelé **MEDAFLOW 30**. Il est conçu à base de poly carboxylates qui améliore les propriétés physiques et mécaniques du béton, ainsi que la maniabilité du béton. Ce plastifiant ne présente pas d'effet retardataire.
- ❖ Les fibres de fil d'attache ont une forme régulière, une bonne résistance à la traction avec un allongement à la rupture importante.
- ❖ L'acier utilisé pour la fabrication des poutres, est disponible dans les marchés, c'est un acier soumis à tous les règlements normalisés.

Vu les résultats obtenus, ces matériaux sont satisfaisants aux conditions requises pour être utilisés pour la recherche d'un béton de propriétés rhéologiques et mécaniques acceptables.

CHAPITRE V :
ÉTUDE DU BÉTON A BASE DE SABLE DE DUNE
CORRIGÉ RENFORCÉ PAR DES FIBRES
MÉTALLIQUES

A) - Optimisation du béton par principe de leur maniabilité et étude de ces propriétés mécaniques

V.1 Introduction

L'étude de la composition d'un béton consiste à 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.

Les différentes méthodes de composition du béton de fibres, pour la plus part empiriques, sont basées sur un grand nombre d'études expérimentales qui doivent aboutir à des recommandations utiles à l'ingénieur. La composition des bétons de fibres métalliques doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé.

V.2 Méthodologie expérimentale

L'objectif de cette partie de notre travail consiste à obtenir une bonne maniabilité de béton renforcé par des fibres issues du déchet métallique (bonne mise en œuvre) avec une bonne résistance mécanique.

Ce travail présente, en premier lieu la formulation d'un béton ordinaire (sans fibres) à base de sable de dune corrigé par un sable alluvionnaire (d'oued). En deuxième lieu, nous avons choisi une formulation optimisée par l'incorporation des fibres, puis étudier l'effet de ces fibres sur :

- Les caractéristiques mécaniques du béton (compression, flexion) ;
- Variation dimensionnelle du béton ;
- Durabilité du béton à l'eau ;
- Vitesse de propagation des sons dans les bétons ;
- Comportement de flexion sur des poutres en béton armées.

V.3 Composition des bétons étudiés

La composition d'un béton consiste dans la détermination des quantités de granulats (sable, gravier, cailloux), de ciment et d'eau nécessaires à mettre pour obtenir un mètre cube de béton.

Deux critères essentiels doivent guider cette étude : la résistance à obtenir et l'ouvrabilité c-à-d. la facilité de mise en œuvre. Ces critères sont en fonction de la nature de l'ouvrage et des parties de l'ouvrage à réaliser.

De nombreuses méthodes pour composer un béton, sont proposées par des spécialistes tels que BOLOMEY, FAURY, VALLETTE, DREUX-GORISSE, SCRAMTAIEV... etc.

Dans cette partie de la recherche, nous allons mener une étude expérimentale de la formulation de béton selon la méthode de DREUX-GORISSE, puis optimiser la composition calculée en utilisant la méthode de BARON LESAGE.

V.3.1 Pré-formulation selon la Méthode de DREUX-GORISSE

La méthode pragmatique de DREUX-GORISSE est largement employée pour les bétons courants. Elle a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant donné satisfaction. Elle est d'autre part très simple d'utilisation puis qu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

La formulation de la méthode est résumée de la manière suivante :

- Le dosage en ciment et en eau à partir de la formule de BOLOMEY [43].
- Les proportions volumétriques des classes granulaires à partir de la courbe granulométrique.
- Les proportions pondérales des constituants pour un mètre cube du béton.
- Consistance plastique : Un affaissement au cône d'Abrams d'environ 5 à 9 cm.
- Résistance : une résistance nominale à la compression à 28 jours de $\sigma_{28} = 25$ MPa.

V.3.1.1 Le dosage en ciment et en eau

Le dosage en ciment et en eau peut être déterminé à partir la relation de BOLOMEY :

$$F_c = G \cdot F_{ce} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (\text{V.1})$$

$$F_c = F_{c28} + 6 \text{MPa} \quad (\text{V.2})$$

Avec :

F_c : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa.

F_{ce} : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa.

C : Dosage en ciment (en kg/m^3).

E : Dosage en eau (en litre pour 1m^3).

G : Coefficient granulaire, ($D \leq 16$ qualité de granulat bonne courante. $G = 0,45$) [Annexe 2].

La résistance moyenne en compression du béton (à 28 jours), $F_{c28} = 25$ MPa.

Un ciment de classe 42,5 a une classe vraie égale 52,5 MPa.

A partir de la relation V.1 et la figure schématisé dans [Annexe 3], on trouve les rapports suivants :

- le rapport $\frac{C}{E} = 1,818$;
- le dosage en ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3$;
- le dosage en eau $E = 220 \text{ L/m}^3$.

V.3.1.2 Les proportions volumétriques des classes granulaires

Les courbes granulométriques des granulats sont présentées sur la figure V-1. On procède à la représentation linéaire de la courbe granulaire de référence *OAB* qui selon DREUX – GORISSE, le point de brisure *A* de la courbe de référence est à l'abscisse $\frac{D}{2} = 8 \text{ mm}$ son ordonnée est donnée par [43] :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p \quad (\text{V.3})$$

Où *K* est un coefficient de correction fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de l'angularité des granulats. Dans notre cas, on opte une valeur de $K = 0$. [Annexe 4]

Le coefficient K_s est un terme correcteur qui tient compte du module de finesse du sable. Il a pour expression :

$$K_s = 6.Mf - 15 \quad (\text{V.4})$$

Relation dans laquelle *Mf* représente le module de finesse, module qui varie entre 2 et 3 généralement.

Pour le sable utilisé : $Mf = 2,33$, soit $K_s = -1,02$.

Donc l'ordonnée correspondant est : $Y = 44,98 \%$ (V.5)

Le coefficient K_p n'est appliqué que lorsque le béton doit présenter un maximum de plasticité ; (cas des bétons pompables). On adoptera une valeur de ce coefficient entre 5 et 10 selon la plasticité désirée.

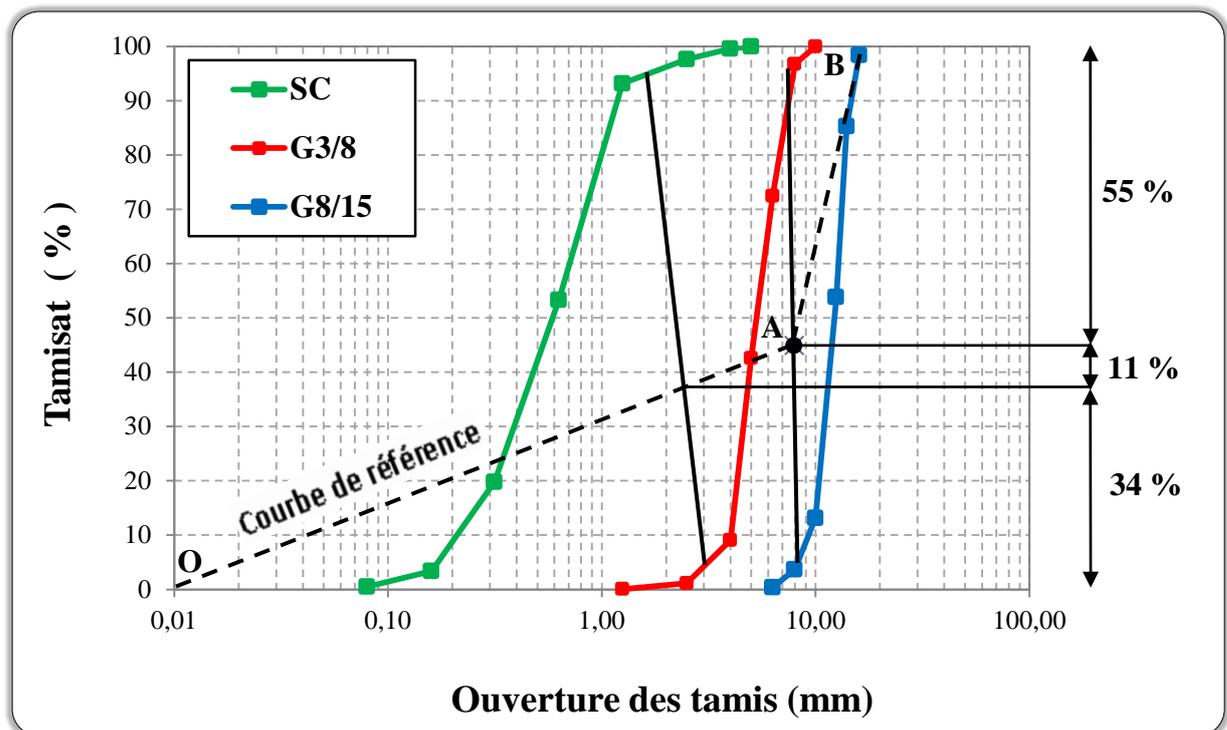


Figure (V-1) : Courbe granulométrique de référence (mm).

La ligne de partage entre les deux granulats s'obtient en joignant le point 95% de la courbe du sable au point 5% de la courbe du gravier 3/8 et la deuxième ligne de partage entre les deux graviers 3/8 et 8/15 (95%, 5%). Les deux points de rencontre des deux lignes de partage avec la courbe de référence *OAB* donne le partage des pourcentages de sable et de gravier 3/8 et 8/15, soit:

- Pourcentage de sable corrigé SC = 34% ;
- Pourcentage de gravier G3/8 = 11% ;
- Pourcentage de gravier G8/15 = 55%.

V.3.1.3 Évaluation des proportions pondérales des composants de béton

Pour estimer les masses des granulats nécessaires à formuler un mètre cube de béton, on doit déterminer le coefficient de compacité γ [Annexe 5]. Cette valeur est choisie en fonction du diamètre D (16mm), de la consistance et du mode de serrage. Ce coefficient est le rapport des volumes réels des composants solides du béton et du volume unitaire de béton frais (1000 litres).

Par interpolation linéaire entre les valeurs $\gamma_{D12,5} = 0,815$ et $\gamma_{D20} = 0,825$ (pour un béton plastique, vibration normal) on obtient $\gamma_{D16} = 0,820$, les volumes absolus des constituants solides sont les suivants :

- Volume total absolu = $1000 \times \gamma = 820$ litres.
- Volume absolu du ciment = $\frac{400}{3.034} = 131,84$ litres.
- Volume absolu des granulats = $820 - 131,84 = 688,16$ litres.
- Volume absolu du sable corrigé SC = $688,16 \times 0,34 = 233,97$ litres.
- Volume absolu du gravier G3/8 = $688,16 \times 0,11 = 75,70$ litres.
- Volume absolu du gravier G8/15 = $688,16 \times 0,55 = 378,49$ litres.

Volume total (vérification) = 820 litres

Les densités absolues des granulats sont : de 2,58 pour le sable corrigé et 2,66 pour le gravier. Il s'ensuit les dosages massiques en matériaux secs suivants :

- Sable corrigé SC = $233,97 \times 2,58 = 603,65$ kg ;
- Gravier G3/8 = $75,70 \times 2,66 = 201,36$ kg ;
- Gravier G8/15 = $378,49 \times 2,66 = 1006,78$ kg ;
- Ciment C = 400 kg ;
- Eau E = 220 L.

Tableau (V-1) : Composition préliminaire selon la méthode de DREUX-GORISSE.

Constituants	Dosage (kg/m ³)
Sable Corrigé SC 0,4.....	603,65
Gravier G3/8	201,36
Gravier G8/15	1006,78
Ciment Cpj 42.5	400
Eau	220

Cette formulation préliminaire doit être optimisée selon la méthode de BARON-LESAGE.

V.3.2 Méthode de BARON-LESAGE

La méthode de BARON-LESAGE, élaborée au niveau du laboratoire des ponts et chaussées, est une méthode expérimentale, qui repose sur les considérations suivantes [43] :

- Pour un dosage en eau et en ciment fixé, le béton le plus maniable est aussi le plus compact, c'est-à-dire présentant un squelette minéral optimal ;
- Le squelette minéral optimal ne dépend pas des teneurs en eau et en ciment ;
- L'introduction de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

V.3.2.1 Détermination du squelette optimal du béton

Les dosages du ciment et de l'eau sont fixés préalablement, il nous reste à déterminer la composition du premier béton d'étude. Pour cela on pourra utiliser le rapport des proportions relatives des granulats constitutifs donné par une méthode de composition traditionnelle (DREUX-GORISSE). Par la suite, il suffit de faire varier le rapport sable/graviers ($\frac{S}{G} = 0,55$ à $0,80$ avec un pas de $0,05$) [85], et de mesurer à chaque fois l'ouvrabilité du béton par la méthode statique (cône d'ABRAMS), les résultats de cet essai ont été rapportés dans la figure V-2.

A partir de la formule suivante on détermine les différentes compositions en fonction de rapport ($\frac{S}{G}$).

$$G = \frac{[M - C(1 + \frac{E}{C})]}{(1 + \frac{S}{G})} \quad (\text{V.6})$$

Avec :

M : Masse totale du béton frais ;

G : Masse du gravier (kg/m^3) ;

S : Masse du sable (kg/m^3) ;

C : Dosage en ciment (kg/m^3) ;

E : Dosage en eau (l/m^3).

La valeur maximale de celle-ci permet de déterminer le rapport ($\frac{S}{G}$) optimal.

Tableau (V-2) : Variation de la maniabilité du béton, en fonction de ($\frac{S}{G}$) pour différentes compositions (kg/m^3).

$\frac{S}{G}$	SC	G3/8	G8/15	Ciment	Eau	Affaissement (cm)
0,55	642,97	198,74	970,30	400	220	5,00
0,60	679,50	192,53	939,98	400	220	5,50
0,65	713,82	186,69	911,49	400	220	6,50
0,70	746,12	181,20	884,68	400	220	6,00
0,75	776,57	176,02	859,41	400	220	3,50
0,80	805,33	171,13	835,53	400	220	2,00

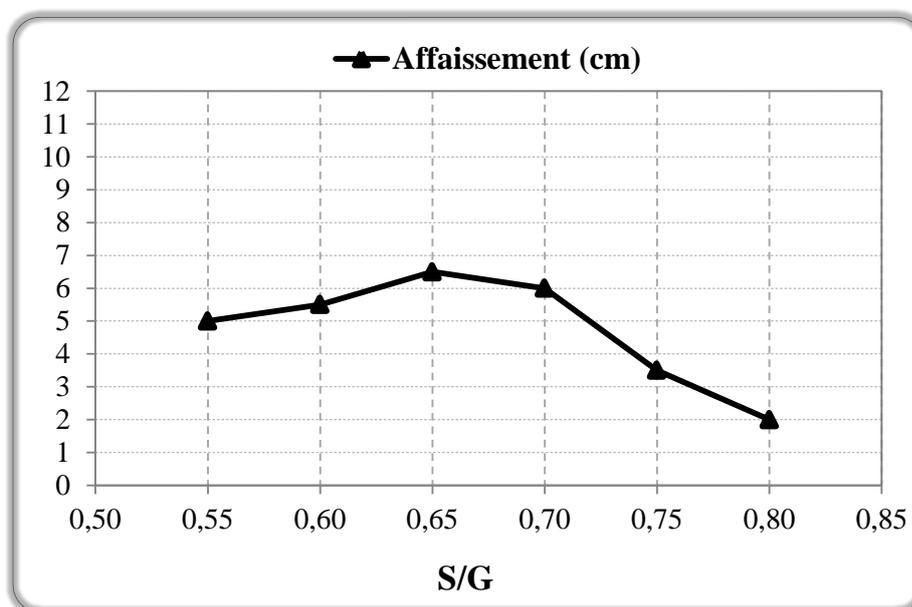


Figure (V-2) : Optimisation du mélange du béton ordinaire (sans fibres).

Cette formulation du béton sans fibres est considérée comme étant la formulation de base pour optimiser les mélanges des bétons aux fibres.

V.3.2.2 Le choix de l'optimisation expérimentale du béton de fibres

Pour composer nos bétons de fibres on prend la composition optimale sans fibres (de béton ordinaire) correspondre à la valeur de $\frac{S}{G}=0,65$. Et on fait varier le dosage en fibres de (0,5% à 1%) en volume des constituants secs (en substituant le volume des constituants sec par un même volume de fibres), et pour les différentes longueurs de fibres (20mm, 50mm).

Et pour avoir presque la même maniabilité des bétons de fibres on a utilisé des dosages en super plastifiant variés de 0,2% jusqu'au 0,5% d'un pas de 0,1% en poids du ciment.

V.3.3 Notation des mélanges

La notation BO désigne (béton ordinaire sans fibres). La notation BF désigne (béton avec fibres) suivie de la lettre C, L désignant la géométrie de la fibre (le béton de fibre courte, longue) (BFC et BFL), suivie d'un chiffre qui représente le pourcentage de fibres introduit x 2.

Tableau (V-3) : Notation des mélanges.

Notation	Désignation
BO	Béton ordinaire
BFC1	Béton de fibres courtes (20 mm) contient de 0,5 % de fibres métalliques
BFC2	Béton de fibres courtes (20 mm) contient de 1,0 % de fibres métalliques
BFL1	Béton de fibres longues (50 mm) contient de 0,5 % de fibres métalliques
BFL2	Béton de fibres longues (50 mm) contient de 1,0 % de fibres métalliques

V.3.4 Recherche du dosage du super plastifiant qui donne la maniabilité souhaité

Tableau (V-4) : L'Affaissement en fonction du pourcentage de super plastifiant (SP).

Affaissement (cm)					
% SP	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
0,00	6,5	-	-	-	-
0,20	-	5	4,5	4,25	3,5
0,30	-	7	6,5	6,5	5
0,40	-	13	12	11,25	7,5
0,50	-	17,5	16,7	15	11

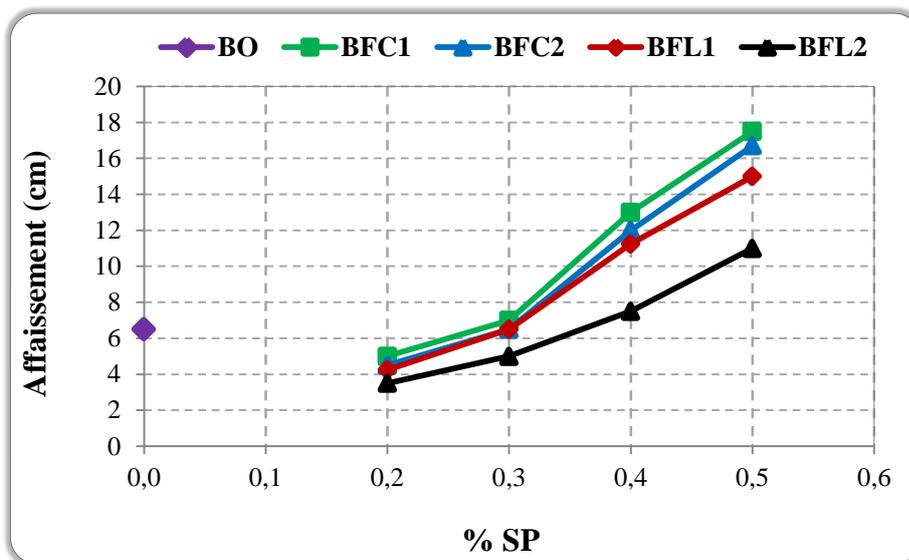


Figure (V-3) : Variation de l’Affaissement en fonction du % de super plastifiant (SP).

V.3.5 Les compositions de différents types de béton étudié

A partir des résultats obtenus dans la figure V-3, nous avons choisi le pourcentage de 0,3 % de super plastifiant (SP) pour composer le béton de fibres, car ces résultats sont plus proches que le béton ordinaire (témoin) qui permet la facilité de mise en œuvre. Soit (6,5 cm) pour le béton ordinaire (voir les tableaux V-4).

Tableau (V-6) : Composition en (kg/m³) des bétons de fibres et du béton ordinaire.

Longueur de fibres (mm)	% de Fibres	Sable SD	Sable SA	Gravier G3/8	Gravier G8/15	Fibres	% de SP	Ciment	Eau
0	0,00	214,15	499,67	186,69	911,49	0,00	0,00	400	220
20	0,50	212,57	496,12	185,32	904,80	39,00	0,30	400	220
	1,00	212,00	492,56	183,95	898,11	78,00	0,30	400	220
50	0,50	212,57	496,12	185,32	904,80	39,00	0,30	400	220
	1,00	212,00	492,56	183,95	898,11	78,00	0,30	400	220

V.4 Préparation du béton

V.4.1 Préparation du béton ordinaire (sans fibres)

Tous les mélanges ont été fabriqués dans un malaxeur à axe vertical d'une capacité maximale de 60 L, le malaxage s'effectue de la façon suivant :

- Introduction du sable, du ciment, et les granulats dans le malaxeur. Le tout est ensuite malaxé pendant 60 secondes ;
- Ajouter l'eau de gâchage d'une façon uniforme ;
- Continuer le malaxage jusqu'à 180 secondes.

V.4.2 Préparation du béton avec fibres

Le béton de fibres a été fabriqué dans les mêmes conditions et avec le même appareillage que le béton ordinaire :

- Introduction du sable, du ciment, et les agrégats dans le malaxeur. Le tout est ensuite malaxé pendant 60 secondes ;
- Les fibres sont introduites progressivement par petite quantité, en forme de pluie ; pour éviter la formation d'oursins « pelotes ». à chaque ajout, il y a malaxage pendant 10 secondes (3 à 5 opérations) ;
- Ajouter l'eau de gâchage au cours du malaxage. le super plastifiant est dilué dans l'eau et ajouté après avoir introduit 50 à 70 % de l'eau de gâchage ;
- Continuer le malaxage jusqu'à 240 secondes.

V.4.3 Confections des éprouvettes et conditions de conservation

Après le malaxage, on remplit les moules à raison de deux couches et vibrer le béton à l'aide d'un vibreur jusqu' à l'apparition d'un léger ressuage, et enfin araser et lisser la surface du béton.

Les éprouvettes sont confectionnées, elles sont placées à l'air libre au laboratoire. Après 24 heures, ces dernières sont démoulées et placées soit sous l'eau (ENVI), soit à l'air libre (ENVII) à une température de $(20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C})$ jusqu' au moment de l'essai, cette procédure est faite pour toutes les compositions et pour tous les essais.

Les éprouvettes confectionnées après étude de l'ouvrabilité de notre béton de fibres sont les suivantes : (selon les normes NF P 18 - 404 et NF P 18 - 405) [86] [Annexe 10].

- Les prismes de $7\times 7\times 28\text{ cm}^3$ pour les essais de :
 - Flexion ;
 - Retrait ;
 - Absorption par capillarité ;
 - Auscultation sonique.
- Les prismes de $10\times 15\times 110\text{ cm}^3$ pour les essais de :
 - Comportement de flexion sur des poutres.
- Les cubes de $10\times 10\times 10\text{ cm}^3$ pour les essais de :
 - Compression ;
 - Absorption par immersion ;
 - Mouillage - Séchage ;
 - Gel - dégel.

V.5 Procédures des essais

V.5.1 Essai sur béton

Deux familles d'essais sont réalisées pour caractériser nos mélanges :

- les essais à l'état frais pour choisir et évaluer la maniabilité du béton ;
- les essais à l'état durci pour déterminer les performances mécaniques du béton.

V.5.1.1 Essais réalisés à l'état frais

En général, il existe plusieurs tests caractérisant les propriétés rhéologiques des bétons de fibres.

Dans cette étude on utilise un seul essai disponible au niveau de laboratoire pour optimiser et caractériser la consistance de notre béton :

- Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS ;

Pour mesurer la masse volumique du béton frais on utilise ;

- Un récipient cylindrique en acier rigide et étanche à l'eau.

V.5.1.2 Essai sur le béton durci

Pour chaque composition étudiée le schéma général valable pratiquement pour tous les essais mécaniques et les essais de durabilité à l'eau sont représenté par l'organigramme de la figure V-5.

Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique.

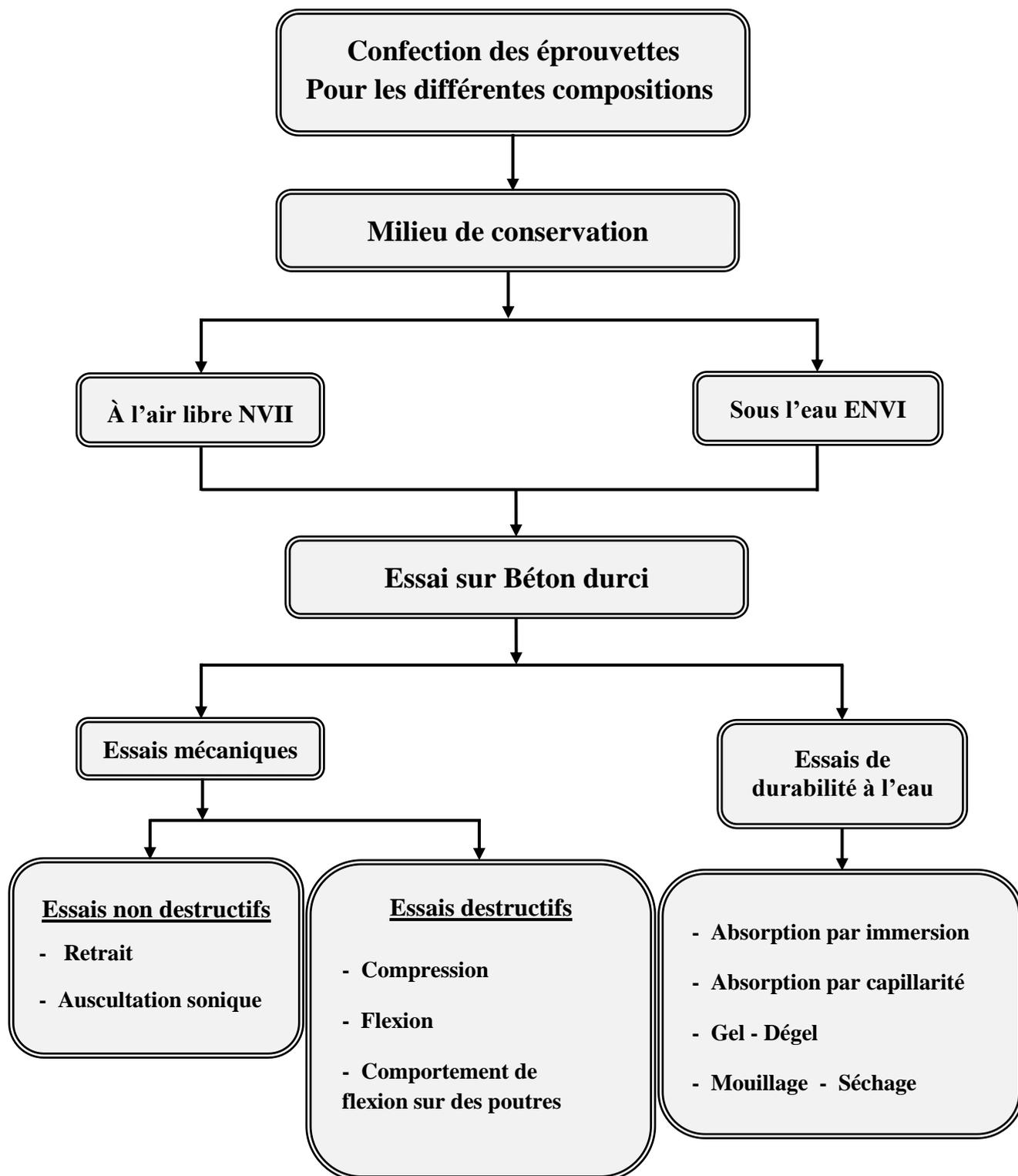


Figure (V-5) : Organigramme représentatif des différents essais effectués.

V.5.2 Essais réalisés à l'état frais

V.5.2.1 Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS

L'essai d'affaissement est effectué dans le but de déterminer la maniabilité du béton. L'essai utilisé est celui décrit par la norme NFP 18-451[87]. Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm) (voir la figure V-6, a). On remplit le cône en 3 couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement (ou SLUMP).

Cette mesure demeure encore aujourd'hui la plus simple et la plus utilisée pour caractériser le comportement rhéologique des bétons de chantier.



Figure (V-6) : Mesure de la consistance (Affaissement au cône d'ABRAMS).

V.5.2.2 Masse volumique du béton frais

La mesure de la masse volumique du béton frais consiste à [89] :

- Prendre le poids de récipient à vide, soit M_0 .
- Remplir un récipient d'un échantillon de volume V et de poids M_0 connu par un échantillon du béton frais, qui a subi vibration.
- Araser et lisser les surfaces et prendre le poids de ce récipient du béton soit M_1 .

La masse volumique de béton frais est :

$$\rho_f = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{V.7})$$

V.5.3 Essais sur le béton durci

Pour calculer les ouvrages, il est nécessaire de connaître les réponses du béton durci aux sollicitations mécaniques susceptibles de lui être appliquées, qu'il s'agisse de sollicitation d'intensité croissantes monotone et de courte durée ou d'intensité constante de longue durée, ou encore cycliques, chacune pouvant être, de plus, mono-axiale ou pluri - axiale [4].

V.5.3.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique du béton durci ρ_d est déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN 12390 -7 [90].

- Peser la masse d'une éprouvette durcie M . pour notre cas, on utilise des éprouvettes $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$.
- La masse volumique est obtenue en divisant la masse M par le volume correspondant aux dimensions de fabrication V .

$$\rho_d = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{V.8})$$

V.5.3.2 Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des éprouvettes cubiques $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ conformément à la norme NFP 18-406 [91]. L'écrasement des éprouvettes est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force $2,4 \pm 0,2 \text{ KN/Sec}$.

La résistance à la compression σ_c est calculée par la formule de la R.D.M suivant :

$$\sigma_c = \frac{F}{S} \quad (\text{V.9})$$



Figure (V-7) : Schématisation du dispositif de compression.

Avec :

σ_c : Contrainte de compression (en MPa) ;

F : Charge de rupture (en KN) ;

S (a^2) : Surface de compression de l'éprouvette (10 x 10 cm²).

V.5.3.3 Résistance à la flexion (flexion 3 points)

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibre car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de chargement dans ces applications. On ajoute des fibres dans la matrice béton pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

C'est l'essai généralement le plus utilisé et le plus connu dans la caractérisation des matériaux.

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7×7×28) cm³ selon la norme NF P. 18-407 [92]

Pour une charge totale F , le moment de flexion constant entre les deux appuis est [6] :

$$M = \frac{FL}{4} \quad (\text{Voir figure V-8}) \quad (\text{V.10})$$

La section S ($=B^2$) pour module d'inertie :

$$\frac{I}{v} = \frac{B^3}{6} \quad (\text{V.11})$$

et la contrainte de flexion correspondante sur la fibre inférieure est :

$$\sigma_f = \frac{M.v}{I} \quad (\text{V.12})$$

$$\sigma_f = \frac{6.M}{B^3} \quad (\text{V.13})$$

La machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10 KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/sec ± 10N/sec.

La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la figure V-8.

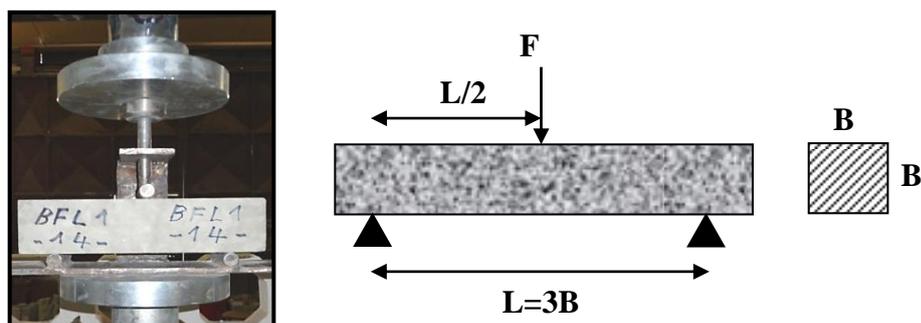


Figure (V-8) : Schématisation du dispositif de flexion 3 points.

V.5.3.4 Etude de variation dimensionnelle du béton de fibres

Le béton est un matériau fragile. Après la prise, il est soumis à des variations dimensionnelles issues des phénomènes de retrait principalement, engendrant l'apparition de fissuration précoce préjudiciable pour la durabilité de l'ouvrage [11].

Le béton est sujet à des variations dimensionnelles de retrait dues à la consommation de l'eau pendant la phase d'hydratation ou à son évaporation. Le béton est un matériau fragile, il a une faible capacité de déformation et une faible résistance en traction. Le phénomène de retrait engendre des contraintes significatives qui peuvent donc conduire à la fissuration.

Dans cette partie nous avons étudié les retraits de séchages, d'une part, et les retraits endogènes d'autre part :

V.5.3.4.1 Retrait de séchage

L'évaporation de l'eau d'un béton conservé dans l'air non saturé provoque du retrait dit de séchage. Le changement de volume d'un béton en cours de séchage n'est pas égal au volume d'eau évaporé. La perte de l'eau libre ayant lieu au début entraîne peu ou pas de retrait. Mais par contre avec la poursuite du séchage l'eau adsorbée disparaît et le changement de volume de la pâte hydratée non bloquée correspond approximativement à cette étape.

V.5.3.4.2 Retrait endogène

Les déformations endogènes d'une pâte de ciment ou d'un béton sont définies comme les déformations qui ont lieu en condition isotherme lorsque le matériau est isolé de tout échange hydrique avec le milieu extérieur. Ces déformations sont une conséquence directe de l'hydratation du ciment [93].

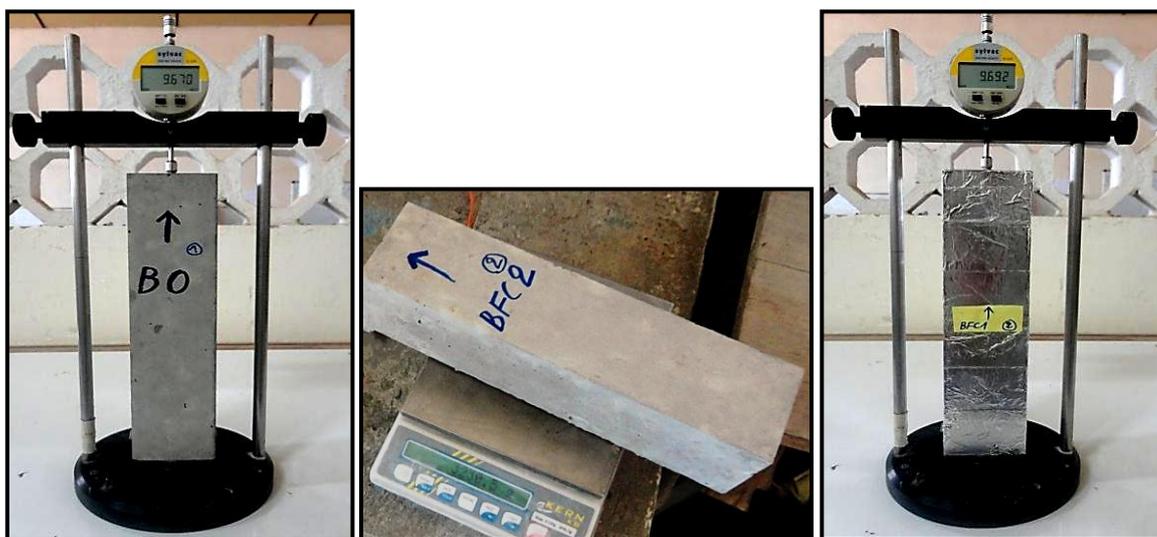
Les éprouvettes utilisées pour la mesure du retrait endogène sont au préalable isolées avec un papier d'aluminium autocollant dans le but d'empêcher le séchage (figure V-9, c). Les retraits endogènes et totaux sont ensuite mesurés régulièrement.

V.5.3.4.3 Principe de mesure des retraits

L'expérimentation mise en œuvre consiste à mener des essais de mesure du retrait de séchage et retrait endogène sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ conformément la norme NFP 18-427 [94], ces éprouvettes sont munies de plots aux extrémités (figure V-9, a, c). Etant donné que le retrait de séchage est fortement influencé par les conditions initiales subies avant et pendant la prise, les éprouvettes sont coulées et conservées après démoulage dans les conditions suivantes (Température ambiante de 23°C, et à une humidité relative 50 %). Les mesures sont effectuées à l'aide d'un comparateur digital de précision de 0,01mm. Un rétractomètre a été utilisé pour mesurer le retrait de séchage et retrait endogène. Le comparateur étant fixe.

V.5.3.4.3.4 Perte en poids

Pour les éprouvettes soumises à la dessiccation, la mesure du retrait de séchage est accompagnée de la mesure de perte en poids. Les pertes en poids constatées correspondent à l'évaporation de l'eau libre. Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance pourvue d'une précision de 0,1g (figure V-9, b).



a) Retrait de séchage

b) mesure la perte en poids

c) Retrait Endogène

Figure (V-9) : Essai de Retrait (Rétractomètre).

Soit :

δ_0 : La mesure initiale ;

$\delta(t)$: La mesure à l'instant t, donc le retrait est déterminé en divisant la contraction de l'éprouvette par sa longueur L.

$$\varepsilon(t) = \frac{\delta(t) - \delta_0}{L} \quad (\text{V.14})$$

V.5.3.5 Essais de durabilité

V.5.3.5.1 Introduction

Les essais de durabilité sont des essais spécifiques qui ont pour objectif de vérifier la préservation. La durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement. Un élément de béton qui subit des cycles de chargement et de déchargement, de mouillage-séchage ou gel-dégel, par exemple, peut se fissurer à cause de ces cycles.

Des agents agressifs extérieurs pénètrent facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées.

Dans cette partie de recherche, nous étudions la durabilité des bétons vis-à-vis des cycles de vieillissement accélérés de mouillage-séchage et gel-dégel.

V.5.3.5.2 Essais mouillage-séchage

L'essai est effectué conformément à la norme ASTM D 559 - 57[95] sur des éprouvettes (10x10x10) cm³. L'essai de mouillage-séchage consiste à soumettre des échantillons de béton à douze cycles de vieillissement accéléré où chacun de ces cycles est caractérisé par cinq heures d'immersion totale des échantillons dans l'eau, suivie par quarante-deux heures de séchage à l'étuve à 71°C [Voir Annexe 11] :

- Mouillage : immersion totale pendant 5 heures.
- Séchage : étuvage à 71°C pendant 42 heures.

Les variations des résistances à la compression avant et après les cycles mouillage-séchage déterminées à 28 jours sont enregistrées et la perte en résistance λ_p^m est donné par :

$$\lambda_p^m = \left(\frac{R_{c28}^i - R_{c28}^m}{R_{c28}^i} \right) \times 100 \quad (\text{V.15})$$

R_{c28}^i : La résistance initiale avant l'essai mouillage-séchage ;

R_{c28}^m : La résistance finale après l'essai mouillage-séchage.

Pour chaque échantillon traité, nous avons notés les différentes absorptions d'eau par cycle ainsi que le taux de perte en masse τ_g représentant le gain entre le premier et le dernier état sec du matériau.

La perte en masse est :
$$\tau_g = \frac{m_m^f - m_m^i}{m_m^i} \quad (\text{V.16})$$

m_m^i : Masse de l'éprouvette initiale sèche avant l'essai mouillage-séchage ;

m_m^f : Masse de l'éprouvette finale sèche après l'essai mouillage-séchage.

V.5.3.5.3 Essais gel-dégel

Il existe un certain nombre de protocoles d'essais pour tester la durabilité d'un béton au gel-dégel. Ces procédures varient d'un pays à l'autre selon la sévérité du climat.

On distingue trois types d'essais de gel-dégel selon les conditions suivantes [76] :

- Gel faible : deux jours par an au maximum ayant atteint une température inférieure à -5 °C.
- Gel sévère : plus de dix jours par an ayant atteint une température inférieure à -10 °C.
- Gel modéré : entre gel faible et gel sévère.

Il existe deux procédures d'essais de gel sur le béton durci : la norme NF P18-424 [96] (gel sévère), NF P18-425 [97] (gel modéré) reprend, en partie, la procédure de l'essai ASTM C666. Les essais consistent à soumettre des éprouvettes prismatiques soit à des cycles de gel dans l'eau et dégel dans l'eau (gel sévère) soit à des cycles de gel dans l'air et dégel dans l'eau (gel modéré). Dans notre cas, et selon la classification citée ci-dessus, le type de gel qui caractérise les conditions climatiques locales est le " gel faible ".

L'essai est basé sur le cycle de gel-dégel et permet d'estimer de manière raisonnable et satisfaisante le comportement en service d'un mélange du béton de fibres. L'essai comprend essentiellement deuze cycles de vieillissement accéléré où chacun est caractérisé par quatre heures de gel (-5 °C) suivi par immersion totale dans l'eau à une température de 23°C jusqu'au dégel complet (quatre heures environ), ont commencé, à 28 jours, les éprouvettes utilisées sont des cubes (10x10x10)cm³.

- Gel : gel à une température -5 °C pendant 4 heures.
- Dégel : immersion totale à une température 23 °C pendant 4 heures.

La perte en résistance caractérisant la résistance au gel λ_R^g est donné par :

$$\lambda_R^g = \left(\frac{R_{c28}^i - R_{c28}^g}{R_{c28}^i} \right) \times 100 \quad (\text{V.17})$$

R_{c28}^i : La résistance initiale avant l'essai gel-dégel ;

R_{c28}^g : La résistance finale après l'essai gel-dégel.

Pour chaque échantillon traité, nous avons notés les différentes absorptions d'eau par cycle ainsi que le taux de perte en masse τ_g représentant le gain entre le premier et le dernier état sec du matériau.

La perte en masse est :

$$\tau_g = \frac{m_g^f - m_g^i}{m_g^i} \quad (\text{V.18})$$

m_g^i : Masse de l'éprouvette initiale sèche avant l'essai gel-dégel ;

m_g^f : Masse de l'éprouvette finale sèche après l'essai gel-dégel.

V.5.3.5.4 Essais d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'eau d'un béton, donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de mettre en évidence la compacité du béton durci : plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible est donc plus il est étanche.

V.5.3.5.4.1 Essais d'absorption d'eau par immersion

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, rappelons que l'essai consiste à mettre les éprouvettes du béton dans l'étuve et de les poser jusqu'à un poids constant, ensuite les immerger totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24h (c'est-à-dire jusqu'à saturation du matériau) afin de calculer le volume des vides du béton [76].

Le coefficient d'absorption par immersion A_b est donné par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{V.19})$$

Avec :

M_a : Masse de l'échantillon imbibée ;

M_s : Masse de l'échantillon sèche après passage à l'étuve à 105 °C.

Les éprouvettes utilisées dans cette partie sont cubiques de dimensions (10x10x10) cm³ et ont été conservées à l'air libre de laboratoire (T = 21°C).

V.5.3.5.4.2 Essais d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité permet de suivre l'évolution de la porosité globale d'un béton ou d'un mortier.

Dans ce travail, cet essai est effectué sur des prismes $7 \times 7 \times 28$ cm³ soumis à une absorption d'eau unidirectionnelle selon le schéma de la figure V-10. Afin d'éviter l'évaporation d'eau par les surfaces latérales des prismes, ceux-ci ont été préalablement recouverts d'une couche de résine.

Conformément à la norme européenne NF EN 480 - 5 [98]. Le coefficient d'absorption capillaire CA est donné par la relation suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \text{ en (gr/cm}^2\text{)} \quad (\text{V.20})$$

Avec :

M_0 : Masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes ;

M_j : Masse de la même éprouvette après le temps requis d'absorption en grammes ;

S : Section de la base de l'éprouvette en centimètre carré.

L'essai est réalisé pendant une durée de temps de 1h 30min à 10min d'intervalles.



Figure (V-10) : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

V.5.3.6 Essais d'auscultation dynamiques

Le principe de la méthode des ultra-sons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les principales caractéristiques de tous les appareils disponibles sur le marché comprennent un générateur d'impulsion et un récepteur d'impulsion comme le montre la figure V-11 [43].



Figure (V-11) : Appareil d'Auscultation dynamique (ultra sonique).

Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NF P 18-418 [99]. Il est effectué sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) conservées à l'air libre.

Après avoir actionné l'appareil on lit le temps de propagation en micro-seconde (μsec). La distance entre les têtes doit être connue avec une précision de 1% pour calculer la vitesse de propagation à l'aide de l'expression suivante :

$$V = \frac{s}{t} \cdot 10^6 \quad (\text{V.21})$$

Avec :

V : La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton en m/sec ;

s : La distance entre les têtes en m.

t : Le temps de propagation en μsec ;

Pour un béton normal on enregistre une vitesse du son variant entre 4000 à 4800 m/sec.

A partir de la vitesse de propagation du son. On peut déterminer quelques paramètres intéressants, à titre d'exemple, module d'élasticité dynamique, la résistance à la compression.

V.5.3.6.1 Module d'élasticité dynamique

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique E_d selon l'expression suivante [43].

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (\text{V.22})$$

Avec :

V : représente la vitesse des ondes, exprimée en Km/s ;

γ : La masse volumique du béton, exprimée en kg/m^3 ;

ν : Coefficient de poisson du béton (en moyen 0.2) ;

E_d : Module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa.

V.5.3.6.2 Résistance à la compression

D'une façon générale, la résistance augmente avec la vitesse de propagation des impulsions. Mais il n'existe pas encore de relation unique valable pour tous les bétons [43]. Pour les bétons étudiés dans notre recherche on admettra que la résistance et le module d'élasticité dynamique sont liés par la relation.

$$\sigma_c = 16,7. \exp\left(\frac{E_d}{122500}\right) \quad (\text{V.23})$$

Avec :

σ_c : Résistance à la compression (MPa) ;

E_d : Module d'élasticité dynamique (MPa).

V.5.3.7 Étude du comportement de flexion sur des poutres armées contenant des fibres d'acier

L'étude de comportement de flexion dans notre recherche intéresse deux paramètres, la flèche à mi-travée, et l'évolution d'ouverture de fissure.

Les essais effectués pour étudier les deux paramètres ont été réalisés au laboratoire de génie civil de l'école nationale polytechnique ENP, à Alger.

V.5.3.7.1 Flèche et ouverture de fissure

Une fissuration non contrôlée est nuisible pour le matériau béton armé ; elle conduit à long terme à un problème de durabilité du fait qu'elle représente un passage aux agents agressifs qui détériorent le béton et l'acier noyé à l'intérieur. Du point de vue structurelle, la fissuration diminue la rigidité des sections en béton armé et avec le temps, toute la partie tendue devient inefficace structurellement puisque fissurée, même si un effet rigidifiant de cette partie tendue subsiste toujours et contribue à réduire la flèche, TAHENNI T et al (2009) [100].

- Les flèches elles sont mesurées à l'aide de comparateurs de précision 10^{-2} mm. L'emplacement des comparateurs est schématisé sur la figure V-12.
- La mesure d'ouverture de fissure est déterminée à l'aide d'une réglette métallique, elle est bien graduée (chaque graduation indique 1/64 inch) [Annexe 12].

V.5.3.7.2 Préparation des poutres

Les essais portent sur cinq poutres de section rectangulaire soumises à un chargement concentré symétrique (chargement en flexion quatre points) (figure V-12). La notation des poutres est faite en tenant compte du mode de renforcement envisagé.

Tableau (V-7) : Nomenclature des différentes poutres destinées à la flexion 4 points.

Différentes poutres coulées	Abréviations
Poutre en béton ordinaire (témoin) avec Armatures transversales	PBO avec At
Poutre en béton ; contient 1% de fibres courtes sans Armatures transversales	PBFC2 sans At
Poutre en béton ; contient 1% de fibres courtes avec Armatures transversales	PBFC2 avec At
Poutre en béton ; contient 1% de fibres longues sans Armatures transversales	PBFL2 sans At
Poutre en béton ; contient 1% de fibres longues avec Armatures transversales	PBFL2 avec At

V.5.3.7.3 Dimensions et ferrailages des poutres

Nous avons adopté le modèle expérimental classique utilisé dans l'étude de comportement mécanique d'un élément de construction sollicité à la flexion quatre points. Les poutres en béton armé ont été sous-dimensionnées et sous ferrillées pour mettre en évidence l'effet du renforcement supplémentaire en fibres métalliques.

Ces poutres ont les dimensions suivantes : une longueur totale de 110 cm avec une longueur entre nus d'appuis de 82,50 cm, et la section transversale est de (10 x 15 cm²).

La figure V-12, donne une illustration du schéma statique équivalent des poutres d'essai.

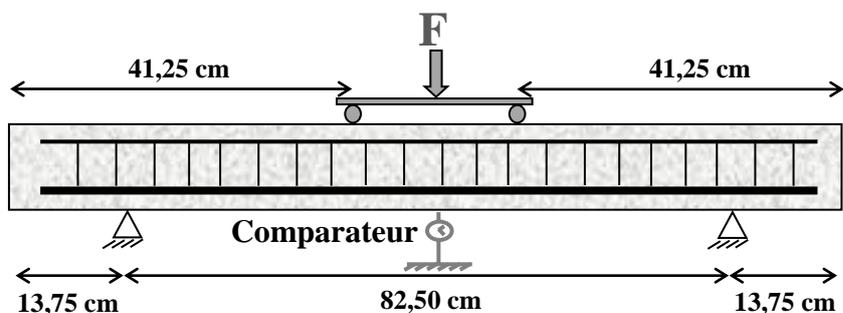


Figure (V-12) : Schéma statique de chargement.

Les aciers utilisés ont des limites d'élasticités suivantes :

- Les ronds lisses FeE24 → Fe = 215 MPa.
- Les hautes adhérences FeE40 → Fe = 400 MPa.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques de résistance du béton pour fabriquer les poutres sont regroupées dans le tableau V-8.

Tableau (V-8) : Les valeurs moyennes de résistances mécaniques à 28 jours.

Résistances mécaniques	BO	BFC2	BFL2
f_{c28} (MPa)	31	33	34
f_{t28} (MPa)	3,08	3,83	4,12

Deux séries de poutres ont été confectionnées avec deux types de ferrailage, avec ou sans armatures transversales, afin notamment de vérifier si l'apport de fibres pouvait modifier le mode de rupture en améliorant la résistance à l'effort tranchant.

Armatures longitudinales et transversales

Pour le renforcement longitudinal de la poutre, deux barres d'acier HA10 pour les armatures tendues (inférieur) et deux barres d'acier HA8 pour les armatures comprimées (supérieur) ont été utilisées. Pour les cadres des armatures, les barres en acier lisses de diamètre Ø6 ont été utilisées. La distance entre les cadres a été fixée à 12 cm figure V-13.

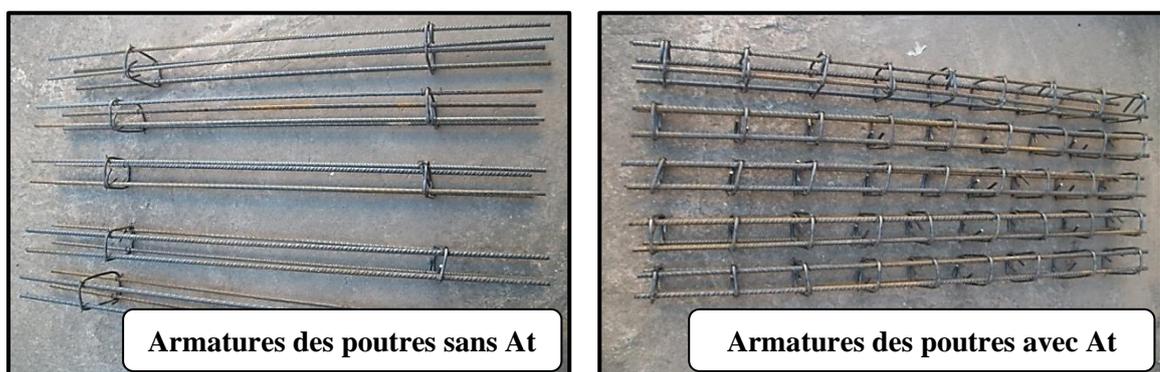


Figure (V-13) : Ferrailage adopté pour les poutres.

V.5.3.7.4 Moment fléchissant théorique

Le moment résistant théorique M_{th} d'une poutre en flexion simple est calculé selon l'organigramme suivant [101] :

f_{bu} : est la valeur de calcul de la contrainte du béton (MPa) ;

θ : Le coefficient θ dépend de la durée d'application des charges ($\theta = 0,85$; durée < 1 h) ;

γ_b : est le coefficient de sécurité $\gamma_b = 1,5$ (cas courants) ;

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours ;

γ_s : est le coefficient de sécurité $\gamma_s = 1,15$ (cas courants) ;

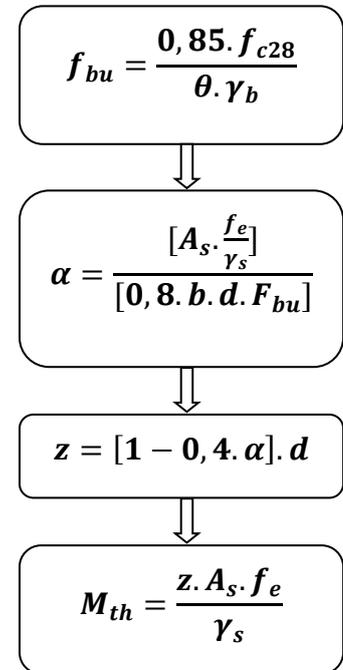
A_s : La section d'armature longitudinale tendue choisie

$$A_s = 1,57 \text{ cm}^2 ;$$

b, h : La largeur et la hauteur de section transversale de la poutre ;

d : Position des armatures tendues par rapport à la fibre la plus comprimée de la section de béton ($d = 0,9. h$) ;

M_{th} : Le moment résistant théorique (KN.m).



B) - Analyses et discussions des résultats

V.6 Essais réalisés à l'état frais

V.6.1 Masse volumique du béton frais

Les résultats de la masse volumique du béton frais pour différents types du béton sont présentés dans le tableau V-9. (Les résultats obtenus représentent la moyenne de trois valeurs).

Tableau (V-9) : Résultats de la masse volumique de béton frais pour différents type du béton.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
ρ_f (kg/m ³)	2392±5,5	2404±6	2420±4	2409±6	2424±7

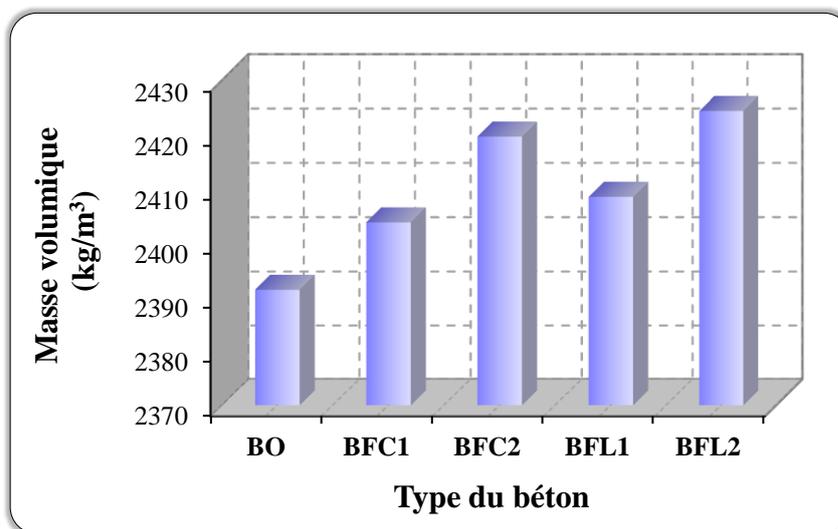


Figure (V-14) : Variation de la masse volumique pour différents types du béton à l'état frais.

D'après les résultats obtenues, nous constatons que la masse volumique augmente en fonction de l'augmentation des longueurs et des pourcentages de fibres introduites dans les compositions de notre béton, cela est dû au fait, que la masse volumique des fibres métalliques est largement supérieur à celle des constituants secs. La même observation marquée par les autres chercheurs MANI Med (2010) [70], et BELFERAAG A (2006) [103].

V.6.2 Consistance du béton

Les résultats de la consistance du béton obtenus par principe de maniabilité sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau (V-10) : Résultats de la consistance pour différents types du béton.

Consistance	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
Affaissement (cm)	6,5	7	6,5	6,5	5

V.7 Essais sur le béton durci

V.7.1 Masse volumique du béton durci

Les résultats de la masse volumique du béton durci pour différents types du béton sont présentés dans le tableau V-11.

Tableau (V-11) : Résultats de la masse volumique de béton durci pour différents type du béton.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
ρ_d (kg/m ³)	2265	2291	2315	2297	2324

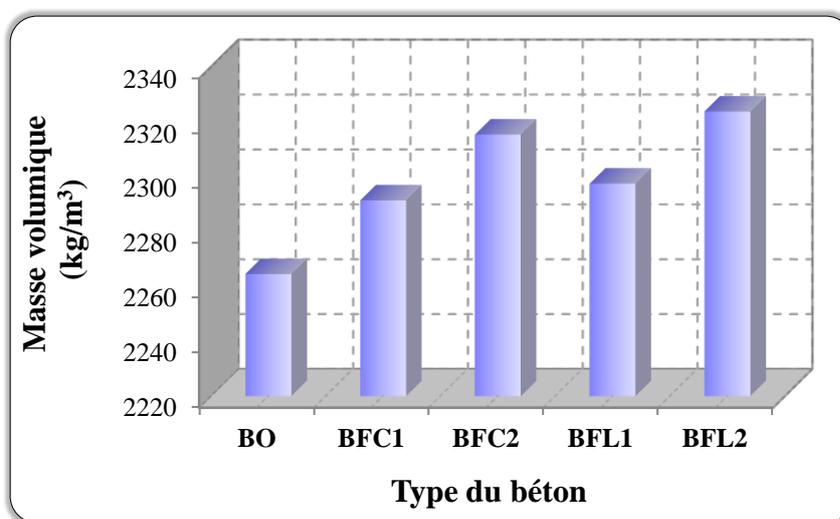


Figure (V-15) : Variation de la masse volumique pour différents types du béton à l'état durci.

D'après les résultats obtenues, nous constatons que la masse volumique du béton durcie augmente en fonction de l'augmentation des longueurs et des pourcentages de fibres introduites dans les compositions de notre béton, c'est de la même manière que la masse volumique de béton frais, cela est dû au fait, que la masse volumique des fibres métalliques reste toujours est largement supérieur à celle des autres constituants de béton.

V.7.2 Effet des fibres sur la résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression pour différents types du béton sont présentés dans le tableau V-12.

Tableau (V-12) : Résistance à la compression pour différents bétons conservés à l'air libre (ENVII).

Résistance à la compression en (MPa) sur cubes (10x10x10) cm³					
Désignation	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours	Taux d'amélioration à 28 jours (%)
BO	19,32	20,75	25,22	26,90	/
BFC1	20,60	23,02	26,80	27,58	6,26
BFC2	21,24	24,47	28,13	28,56	11,54
BFL1	20,13	22,26	25,82	28,89	2,38
BFL2	23,48	25,74	28,21	30,00	11,86

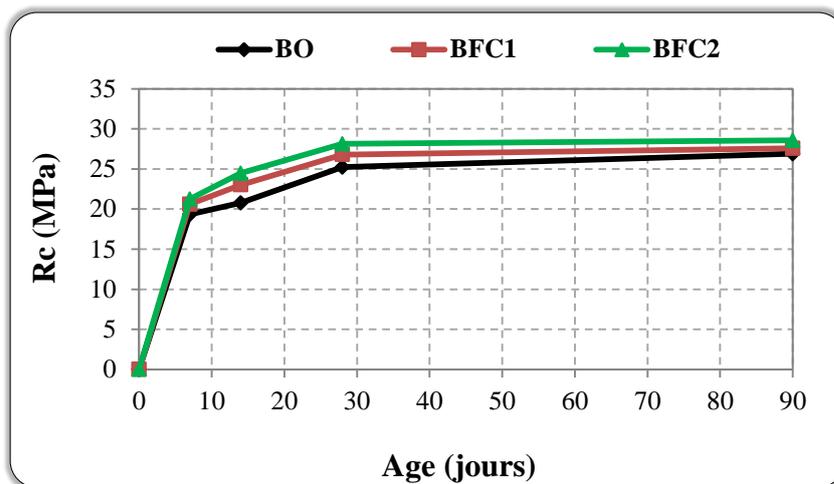


Figure (V-16) : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés à l'air libre (ENVII).

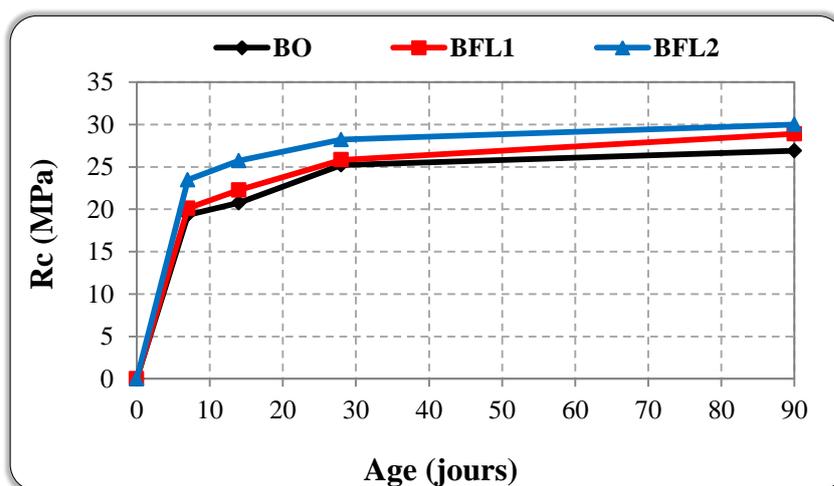


Figure (V-17) : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés à l'air libre (ENVII).

Tableau (V-13) : Résistance à la compression pour différents bétons conservés sous l'eau (ENVI).

Résistance à la compression en (MPa) sur cubes (10x10x10) cm ³					
Désignation	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours	Taux d'amélioration à 28 jours (%)
BO	25,20	26,48	31,60	34,35	/
BFC1	26,14	28,64	32,85	34,63	3,96
BFC2	28,05	30,56	33,81	35,24	6,99
BFL1	27,48	28,94	32,06	35,40	1,46
BFL2	28,14	30,24	32,91	37,19	4,15

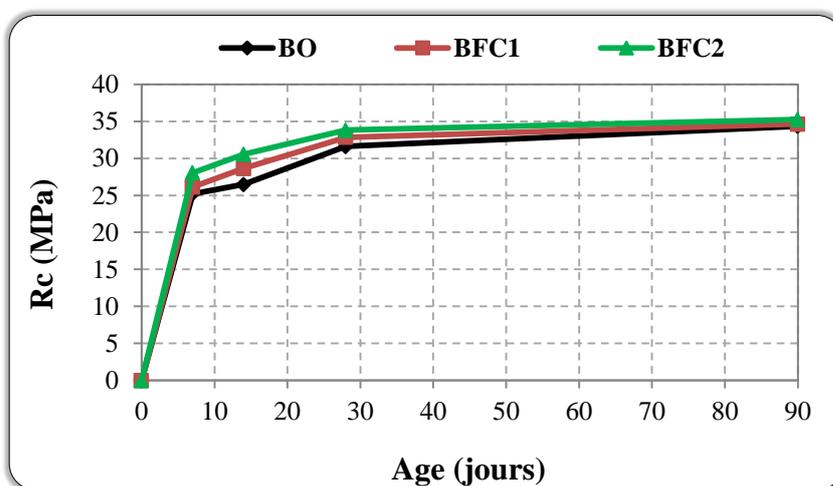


Figure (V-18) : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés sous l'eau (ENVI).

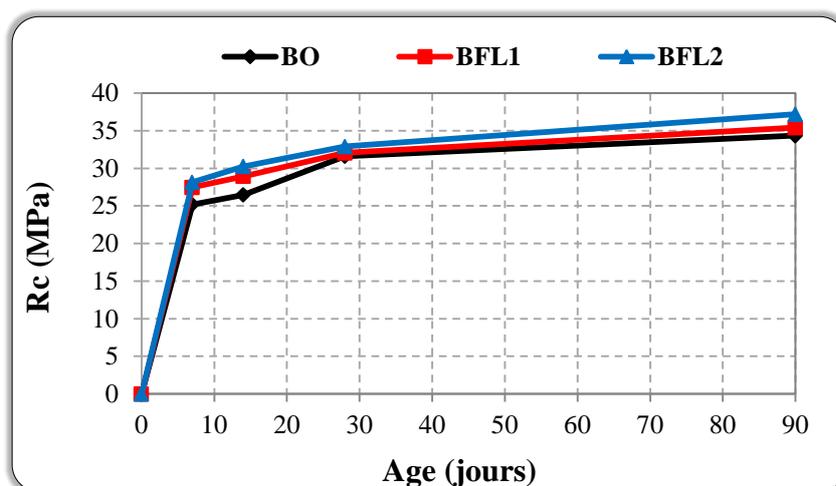


Figure (V-19) : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés sous l'eau (ENVI).

On remarque selon les résultats représentés dans les figures V-16, 17, 18, 19. La résistance à la compression des bétons fibrés évolue avec l'élancement et le dosage des fibres métalliques pour les deux modes de conservations sous l'eau ENVI et à l'air libre ENVII.

Cette évolution est plus remarquable dans les bétons confectionnés avec les dosages de fibres de 1% que dans ceux préparés avec de dosage inférieur.

La résistance en compression à 28 jours (âge habituel) des bétons renforcés de fibres métalliques, ne diffère pas beaucoup du béton témoin.

Les figures V-16, 18, montrent qu'il y a une amélioration variant de 6,26 à 11,54 % par rapport au béton témoin, pour un dosage de fibres courtes (0,5 à 1 %) avec le mode de conservation à l'air libre, et 3,96 à 6,99 % par rapport au béton témoin, pour un dosage de fibres courtes (0,5 à 1 %) avec le mode de conservation sous l'eau.

D'après ROSSI P (1998) [29], les fibres courtes ont toujours des résistances à la compression supérieures à celles du béton non fibré. Cela confirme les résultats obtenus pour les bétons de fibres courtes.

Pour les bétons renforcées par des fibres longues, Les figures V-17, 19, montrent qu'il y a aussi une augmentation de résistance à la compression variant de 2,38 à 11,86 % par rapport au béton témoin, pour un dosage de fibres longues (0,5 à 1 %) avec le mode de conservation à l'air libre, 1,46 à 4,15 % par rapport au béton témoin, pour un dosage de fibres longues (0,5 à 1 %) avec le mode de conservation sous l'eau.

Cette augmentation de résistance en compression engendré par l'ajout des fibres. C'est-à-dire est liées essentiellement à la forme, la géométrie et la quantité de ces fibres, car les fibres droites et lisses avec un pourcentage faible (de notre cas 1 %) ne posent pas de problème d'enchevêtrement et de formation d'oursins "pilotes "(contraire pour le cas des fibres ondulées ou de crochet aux extrémités avec un pourcentage élevé). Donc, leur présence dans la matrice, vraiment augmente légèrement la porosité, mais ne provoque pas une baisse de résistance.

Généralement l'ajout de fibres métalliques avec une bonne orientation et distribution au sein de la matrice, améliore de façon importante la ductilité du matériau, et améliore aussi le seuil de fissuration (voir la photo V-1).

Des études faites par BEN YAHIA A (2001) [30], et MANI Med (2010) [70], sur le comportement du béton de fibres métalliques, confirment l'amélioration apportée par ces fibres sur la résistance en compression, mais d'autre chercheur ROSSI P (1998) [29], confirment le contraire sont d'accord pour dire que les fibres longues n'apportent pas d'amélioration sensible en compression.

Mode de rupture en compression pour différents types de béton à 28 jours



Béton ordinaire **BO**



BFC1

BFC2

BFL1

BFL2

Photo (V-1) : Destruction finale des éprouvettes (10x10x10) cm³ par la compression.

V.7.3 Effet des fibres sur la résistance à la flexion (7x7x28 cm³)

Tableau (V-14) : Résistance à la flexion pour différents bétons conservés à l'air libre (ENVII).

Résistance à la flexion (MPa)					
Désignation	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours	Taux d'amélioration à 28 jours (%)
BO	3,72	4,07	4,33	4,38	/
BFC1	3,83	4,37	4,58	4,62	5,77
BFC2	3,97	4,53	4,77	4,80	10,00
BFL1	4,10	4,62	4,87	4,92	12,31
BFL2	5,12	5,62	5,87	5,95	35,38

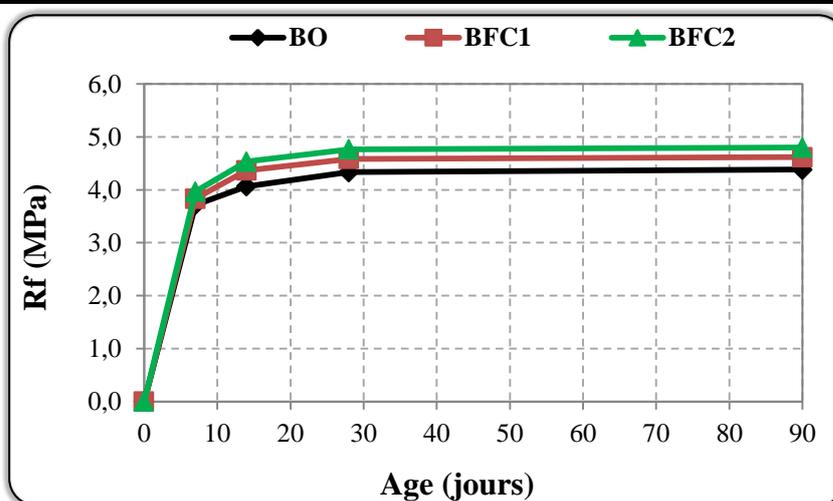


Figure (V-20) : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés à l'air libre (ENVII).

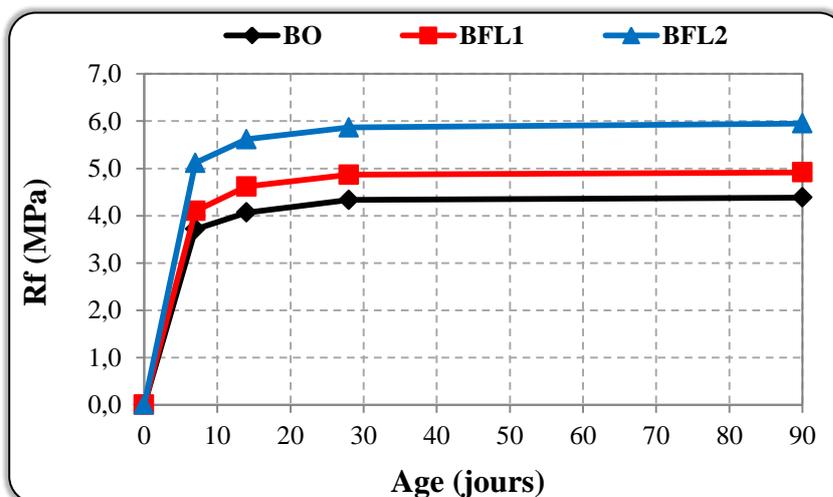


Figure (V-21) : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés à l'air libre (ENVII).

Tableau (V-15) : Résistance à la flexion pour différents bétons conservés sous l'eau (ENVI).

Résistance à la flexion (MPa)					
Désignation	7 jours	14 jours	28 jours	90 jours	Taux d'amélioration à 28 jours (%)
BO	4,85	5,13	5,77	6,12	/
BFC1	5,33	5,48	6,10	6,90	5,78
BFC2	5,53	5,70	6,27	7,15	8,67
BFL1	5,63	6,13	6,75	6,85	17,05
BFL2	6,27	7,32	7,92	7,98	37,28

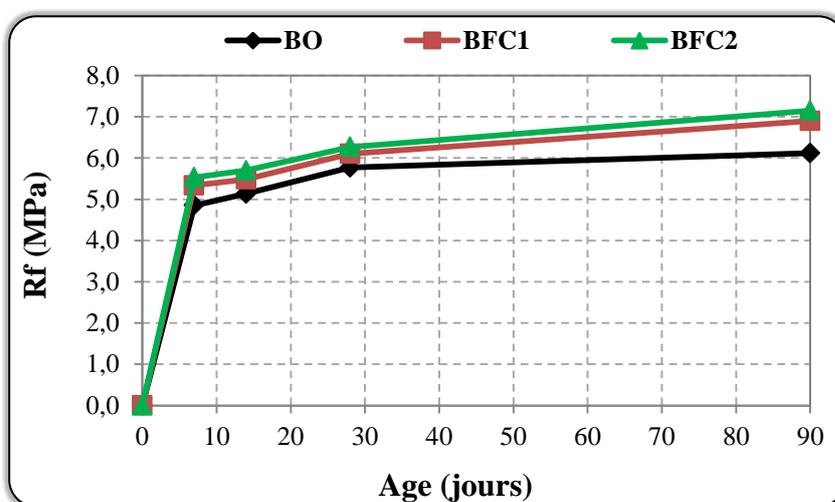


Figure (V-22) : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFC1 et BFC2) conservés sous l'eau (ENVI).

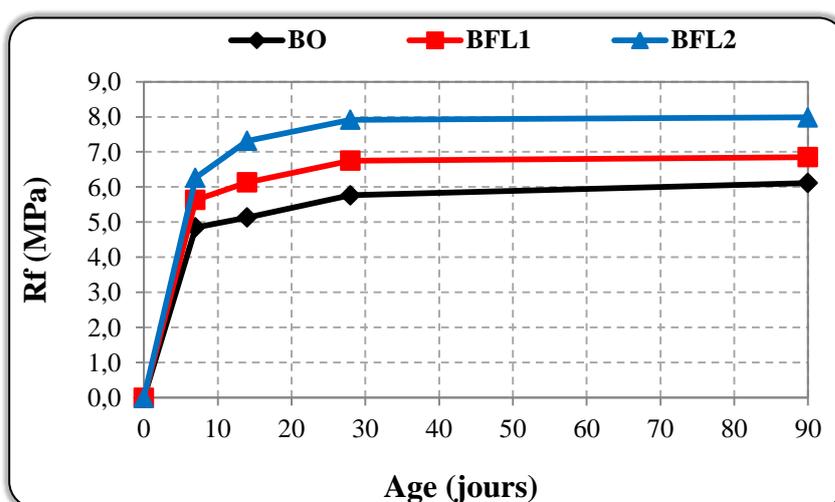


Figure (V-23) : Evolution de la résistance à la flexion en fonction du temps pour les bétons (BO, BFL1 et BFL2) conservés sous l'eau (ENVI).

Les résultats illustrés par les figures V-20, 21, 22, 23. Montrent que pour tous les bétons nous avons une augmentation de la résistance à la flexion, ce qui est conforme à tous les résultats trouvés dans la littérature en ce qui concerne cette particularité. Il y a une nette augmentation de la résistance à la flexion pour tous les mélanges de 7 à 90 jours. Comme on peut le constater, la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation du dosage et l'élancement des fibres.

D'après HOCINE O (1998) [102], cette augmentation s'explique par la présence des fibres dans la matrice. Elles jouent un triple rôle : elles permettent une mobilisation d'une plus grande partie d'énergie élastique dans le matériau, elles augmentent l'énergie consommée au voisinage de la fissure, et enfin elles servent d'élément de couture sur les lèvres des fissures.

Les figures V-21, 23, montrent une amélioration apportée par l'incorporation des fibres longues par rapport au béton ordinaire (témoin). Elles sont beaucoup plus importantes.

Un dosage de (0,5 à 1,0 %) de fibres longues apporte un gain de résistance à la flexion à 28 jours variant de 12,31 à 35,38 % par rapport au béton témoin pour le mode de conservation à l'air libre ENVII, 17,05 à 37,28 % par rapport au béton témoin pour le mode de conservation sous l'eau ENVI.

Cette amélioration est liée par l'importance et le rôle de l'élancement de ces fibres, lorsque la longueur des fibres augmente, les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées, c'est-à-dire, après la formation de la première fissure, les spécimens continuent à prendre plus de chargement. Avec l'augmentation de la charge, la fissure s'élargit graduellement à travers l'arrachement des fibres du béton.

D'après les études de MASMOUDI M (2008) [4], montrent que l'incorporation des fibres métalliques, dont la longueur est de 50 mm avec un dosage de 1 %, augmente la résistance à la flexion d'environ 63 % par rapport au béton non fibré. Cela confirme les résultats obtenus pour les bétons de fibres longues.

Les résultats représentés dans les figures V-20, 22 montrent que le pourcentage de 0,5 à 1 % de fibres métalliques courtes dans le béton a fait augmenter sa résistance à la flexion par rapport au béton témoin à l'âge de 28 jours de 5,77 à 10 % pour le mode de conservation à l'air libre ENVII, et 5,78 à 8,67 % pour le mode de conservation sous l'eau ENVI. Cette amélioration n'est pas significative et elle reste beaucoup plus faible que l'amélioration par l'ajout de fibres longues.

Et enfin on peut dire que, malgré la forme de ces fibres droites et lisses (mauvaise adhérence, facilité d'arrachement), la résistance à la flexion des bétons de fibres courtes ou longues reste toujours supérieure à celle des bétons témoin sans fibres.

Mode de rupture en flexion pour différents types de béton à 28 jours

Lors des essais mécaniques, le mode de rupture pour les éprouvettes en béton seul (béton ordinaire) est de type fragile (rupture brutale) ceci est dû à sa faible résistance à la traction. Alors que pour les bétons composites à différentes longueurs en fibres, on a observé une rupture ductile avec une densification des microfissures. Ceci s'explique par l'ajout de fibres métalliques, dont le rôle est de stopper la propagation rapide des fissures en les cousant (après formation des fissures, les lèvres sont toujours reliées par les fibres par effet de goujon).

- Rupture fragile du béton ordinaire BO -



- Densification de fissures et rupture ductile des bétons BFC2, BFL2 -

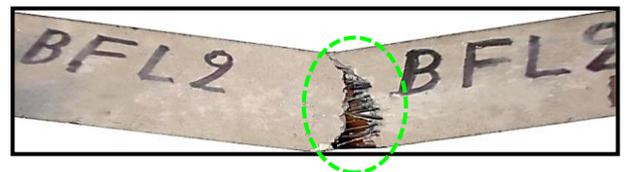


Photo (V-2) : Destruction finale des éprouvettes (7x7x28) cm³ par la flexion.

V.7.4 Etude de variation dimensionnelle (7x7x28 cm³)

V.7.4.1 Retrait de séchage

Les mesures de retrait sont déterminées uniquement en utilisant un seul environnement c'est à l'air libre. Le retrait est effectué en fonction des différents âges de béton. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau IV-16, et illustré sur les figures V-24, 25. Nous avons examiné l'influence, sur le retrait des variations des dosages et des longueurs de fibres métalliques.

Tableau (V-16) : Résultats du retrait de séchage pour différents types de béton en ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Age (jours)	Différents types du béton				
	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
1	0	0	0	0	0
2	45	35	32	28	25
3	72	69	61	59	54
4	124	114	97	86	78
5	176	152	124	121	99
12	204	179	147	144	131
19	297	262	249	238	190
28	304	269	253	245	197
35	335	290	269	262	214
45	345	299	278	267	217
55	352	304	285	276	221
65	353	304	286	276	221
75	354	305	287	277	222
85	354	305	288	277	222
90	355	306	289	278	222

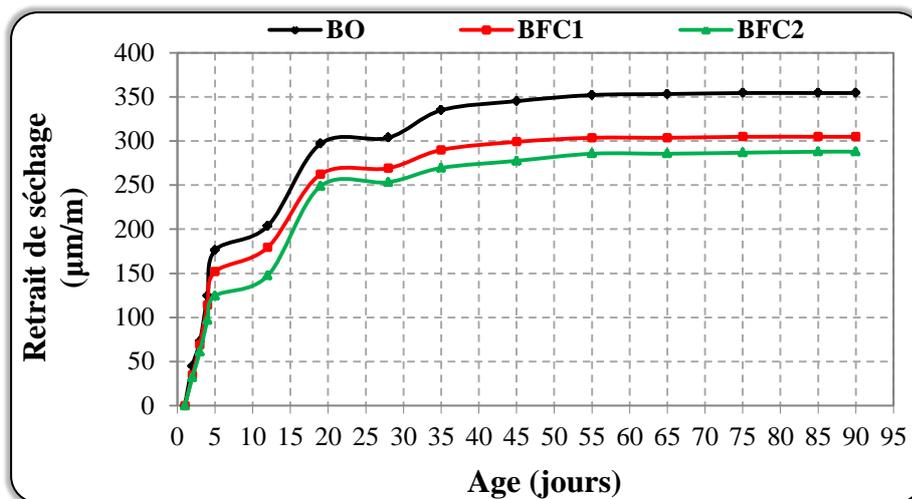


Figure (V-24) : Evolution de retrait de séchage des bétons (BO, BFC1 et BFC2) en fonction du temps.

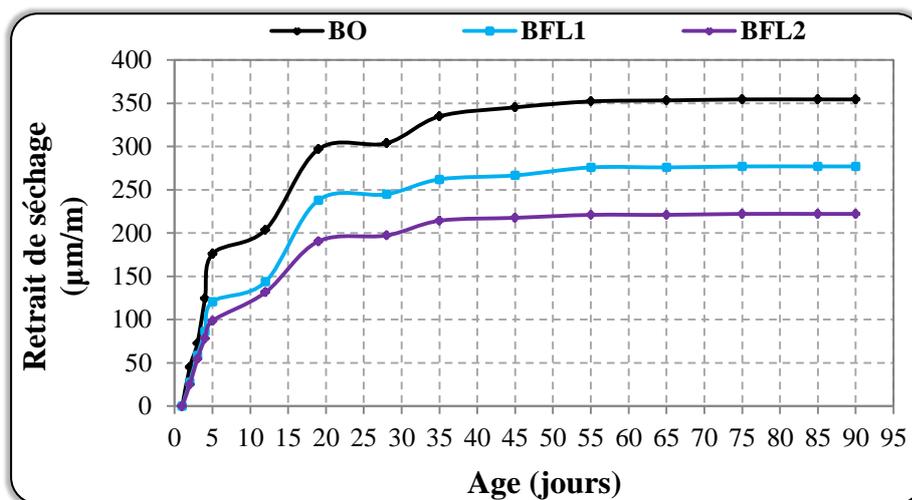


Figure (V-25) : Evolution de retrait de séchage des bétons (BO, BFL1 et BFL2) en fonction du temps.

V.7.4.2 Retrait endogène

Les résultats obtenus du retrait endogène sont représentés dans le tableau V-17, et illustré sur les figures V-26, 27, pour les différents types du béton.

Tableau (V-17) : Résultats du retrait endogène pour différents types de béton en ($\mu\text{m/m}$).

Age (jours)	Différents types du béton				
	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
1	0	0	0	0	0
2	17	14	14	10	9
3	53	39	24	22	22
4	70	50	26	28	21
5	86	61	29	34	20
12	109	81	55	47	26
19	157	142	95	108	56
28	194	175	119	151	74
35	212	191	131	172	83
45	228	205	142	191	91
55	242	217	151	206	97
65	266	242	180	223	121
75	272	249	188	230	128
85	275	252	191	233	131
90	288	262	203	245	143

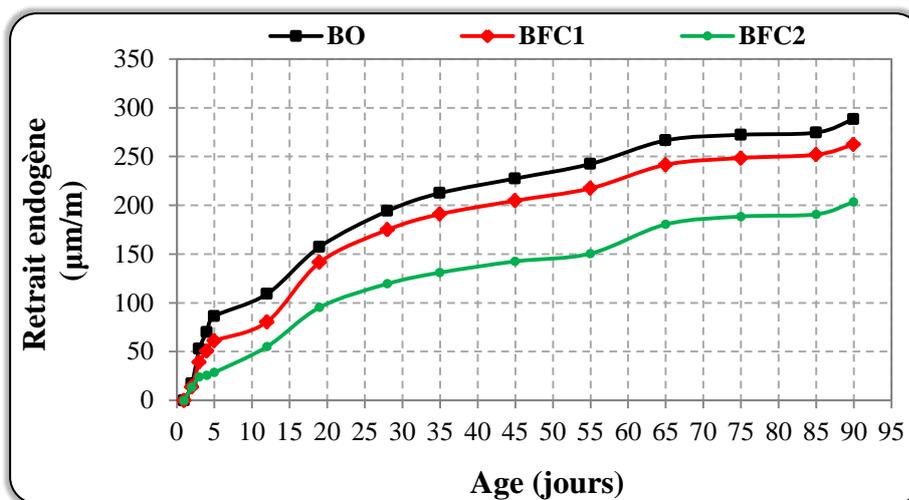


Figure (V-26) : Evolution de retrait endogène des bétons (BO, BFC1 et BFC2) en fonction du temps.

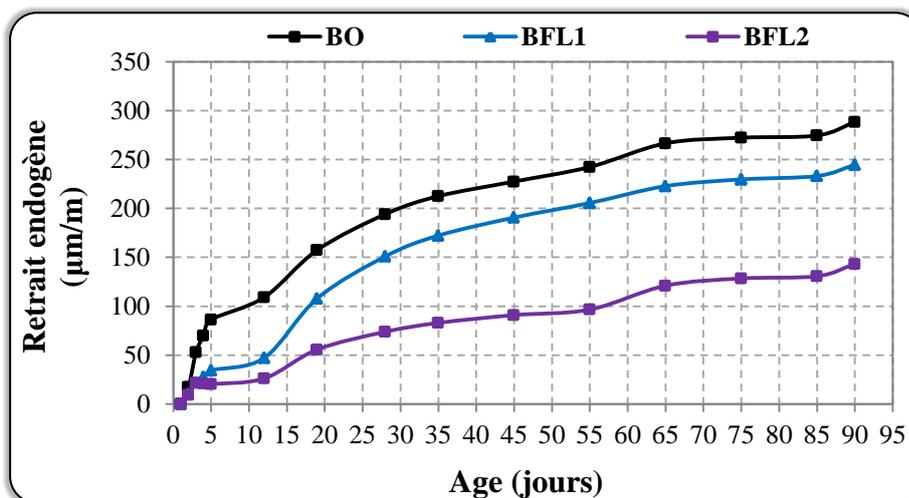


Figure (V-27) : Evolution de retrait endogène des bétons (BO, BFL1 et BFL2) en fonction du temps.

Les déformations de retrait de séchage et endogène sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal (sans fibres).

D'après les résultats reportés sur les figures V-24, 25, 26, 27. On peut constater que les fibres métalliques diminuent vraiment le retrait du béton, cette diminution est proportionnelle avec le dosage et la longueur de fibres.

On remarque que les résultats obtenus dans le tableau V-16 et illustré dans la figure V-24, que l'importance et l'intérêt de fibres courtes sur le retrait de séchage est de l'ordre de (14 à 19 %) à 90 jours pour les deux proportions de fibres (0,5 et 1 %), Nos résultats confirment ceux déjà obtenus lors d'études antérieures sur l'influence des fibres sur le retrait. Certaines annoncent une diminution des déformations de retrait libre allant jusqu'à 40 %, MANGAT P S et al (1988) [42]. Des réductions du même ordre ont été mesurées par BELFERAAG A (2006) [103] avec un ajout de 1 à 1,5 % de fibres métalliques issues des déchets pneumatiques.

La figure V-25, montre que l'augmentation de la quantité de fibres longues provoque une diminution du retrait de séchage de l'ordre de (22 à 37 %) pour les deux proportions de fibres (0,5 et 1 %) à 90 jours. Cette diminution du retrait est liée essentiellement de l'élancement (l/d) de ces fibres, car l'élancement de ces fibres c'est le facteur les plus importants qui diminue le retrait.

ABDOU K (2007) [13], montre que la contrainte de déformation du béton renforcé de fibres due aux fibres est le résultat du mécanisme d'interface du joint entre les fibres et la matrice.

Des valeurs larges (l/d) peut favoriser une aire de contact large le long de l'interface et peut augmenter la capacité de la contrainte, qui permet d'avoir une réduction de retrait, cela traduit par la figure suivante.

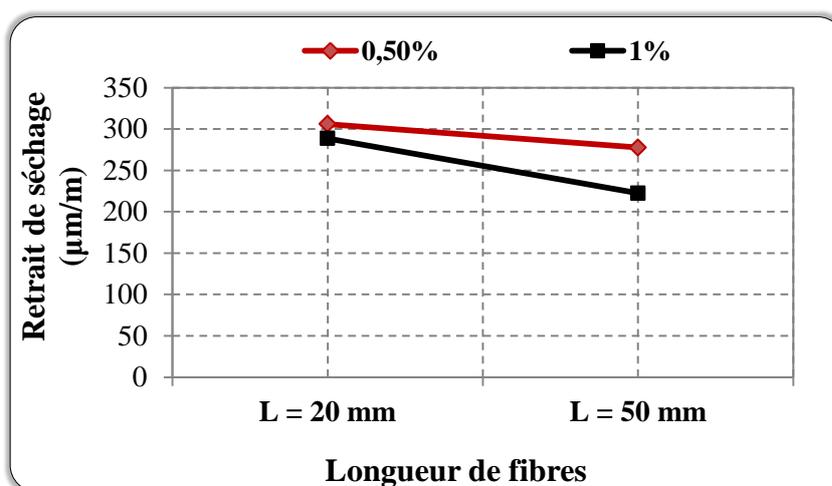


Figure (V-28) : Influence de la longueur et de pourcentage de fibres métalliques sur le retrait de séchage à 90 jours.

La figure V-28, illustre l'influence de la longueur et de pourcentage de fibres métalliques sur le retrait.

Comme expliqué précédemment, il est nettement visible que les fibres longues de pourcentage 0,5 à 1 % diminuent fortement le retrait par rapport aux fibres courtes de même dosage. Cette diminution est de l'ordre 9,16 à 22,95%. Ceci s'explique par l'effet de la géométrie des fibres sur le retrait qui est significative.

Malgré la porosité importante de béton de fibres par rapport au béton sans fibres. Il y a une diminution du retrait de séchage, ceci s'explique par le rôle efficace de ces fibres sur les déformations dans le béton.

Pour le deuxième type de déformation (retrait endogène). On constate que le retrait de séchage était plus important que le retrait endogène. Cette constatation déjà marqué par d'autres chercheurs, HADJOUJDA M et al (2011) [104] sur les déformations de retrait (libre et endogène) d'un béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques.

Un ajout des fibres courtes d'un pourcentage (0,5 à 1%) en volume, diminue le retrait endogène de 9 à 32,5 % pour un âge de 90 jours, mais un ajout des fibres longues avec le même pourcentage, il y a une diminution du retrait plus importante, il varie de 14,9 à 59 %. Même observation enregistré précédemment et concerne l'étude de retrait de séchage sur l'efficacité du pourcentage et la longueur de fibres sur la diminution du retrait. Mais dans ce cas on remarque que le dosage et la longueur de ces fibres a diminué les déformations endogènes plus forte par rapport au premier cas (déformation libre).

V.7.4.3 Perte en poids

Les pertes en poids constatées pendant le durcissement correspondant à l'évaporation de l'eau libre par suite de la différence d'hygrométrie avec l'ambiance extérieure.

Le tableau IV-18, et la figure IV-29 présentent l'évolution moyenne des quantités d'eau évaporées en fonction du temps pour les différents types du béton.

Tableau (V-18) : Résultats de la perte en poids pour différents types du béton en (%).

Age (jours)	Différents types du béton				
	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
1	0	0	0	0	0
2	0,90	0,95	0,97	1,02	1,19
3	1,20	1,26	1,29	1,37	1,48
4	1,38	1,45	1,48	1,58	1,66
5	1,54	1,61	1,65	1,74	1,81
12	1,65	1,72	1,77	1,86	1,93
19	2,27	2,34	2,43	2,54	2,61
28	2,41	2,46	2,55	2,68	2,76
35	2,46	2,56	2,67	2,75	2,90
45	2,49	2,55	2,69	2,78	2,94
55	2,50	2,58	2,71	2,80	2,95
65	2,52	2,60	2,74	2,81	2,97
75	2,54	2,61	2,77	2,84	2,99
85	2,55	2,63	2,78	2,85	3,01
90	2,61	2,71	2,82	2,91	3,08

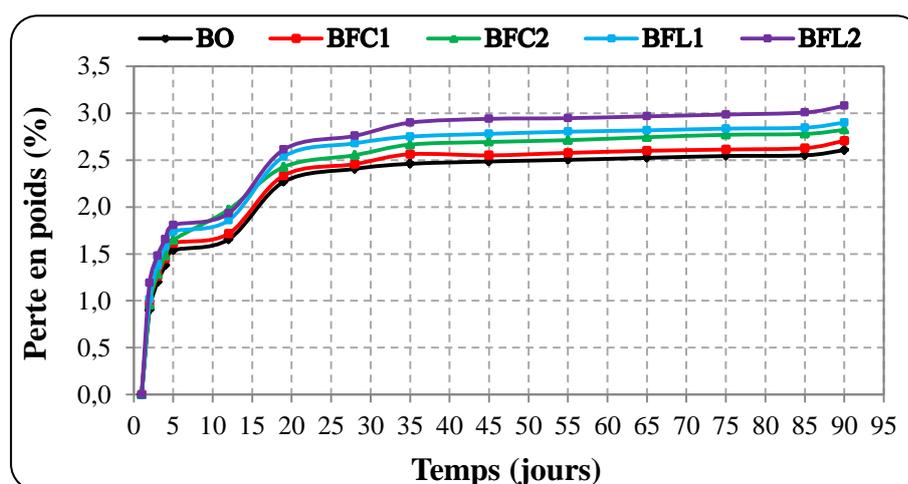


Figure (V-29) : Variation de la perte en poids de différents types du béton en (%).

Nous distinguons deux étapes différentes pendant l'évolution des variations de masse : pour tous les bétons, la cinétique est accélérée jusqu'à un âge de 12 jours, au-delà de cet âge elle est stabilisée

On peut observer sur la figure V-29, que la perte en poids augmente avec l'augmentation de dosage et de longueur des fibres métalliques. Cette augmentation de la perte en poids se traduit par la présence de fibres, qui créent un chemin dans la matrice préférentiel pour faciliter le départ de l'eau.

La figure V-30 de retrait de séchage en fonction de la perte en poids donne une idée claire sur l'importance et l'intérêt de l'ajout de fibres métalliques sur le retrait de béton, la perte en poids importante pour les bétons de fibres mais le retrait de ces derniers toujours inférieur par rapport au béton seul (sans fibres).

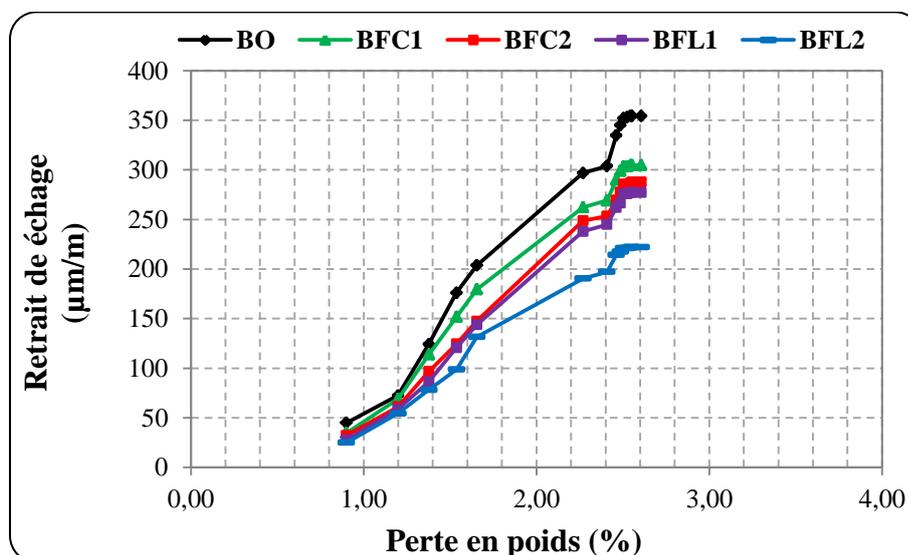


Figure (V-30) : Variation du retrait séchage en fonction de la perte en poids pour différents types du béton.

Cette figure montre la cinétique de la perte en poids pour la même durée de séchage. Différents fractions volumiques de fibres sont illustrées sur cette figure. Le BO de référence a subi un retrait de séchage relativement maximal tout au long du séchage.

En examinant les autres bétons de fibres, l'accélération dans la perte en poids et dans le retrait diminue avec le temps.

La relation entre ces deux propriétés (la perte en poids et le retrait) pour chaque béton est quasi-linéaire. La diminution dans la perte en poids s'annule après un certain temps où l'échantillon ne se rétrécit plus, c'est-à-dire, la stabilisation du retrait.

V.7.5 Essais de durabilité

V.7.5.1 Essais mouillage-séchage (10x10x10 cm³)

Nous avons également, étudié l'influence des cycles de mouillage-séchage sur la résistance à la compression pour les différents types du béton, et comparer avec les résistances à la compression d'éprouvettes des mêmes mélanges conservées dans l'eau prise comme témoin.

L'effet de mouillage-séchage sur la résistance à la compression est représenté au tableau V-19 et sur la figure V-31 (voir le paragraphe V.5.3.5.2).

Tableau (V-19) : Influence du mouillage-séchage sur la résistance à la compression à 28 jours.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
R_{c28}^i (MPa) avant mouillage-séchage	31,60	32,85	33,81	32,06	32,91
R_{c28}^m (MPa) après mouillage-séchage	27,40	29,27	29,80	27,97	28,87
Perte en résistance λ_r^m (%)	13,29	10,91	11,86	12,77	12,29

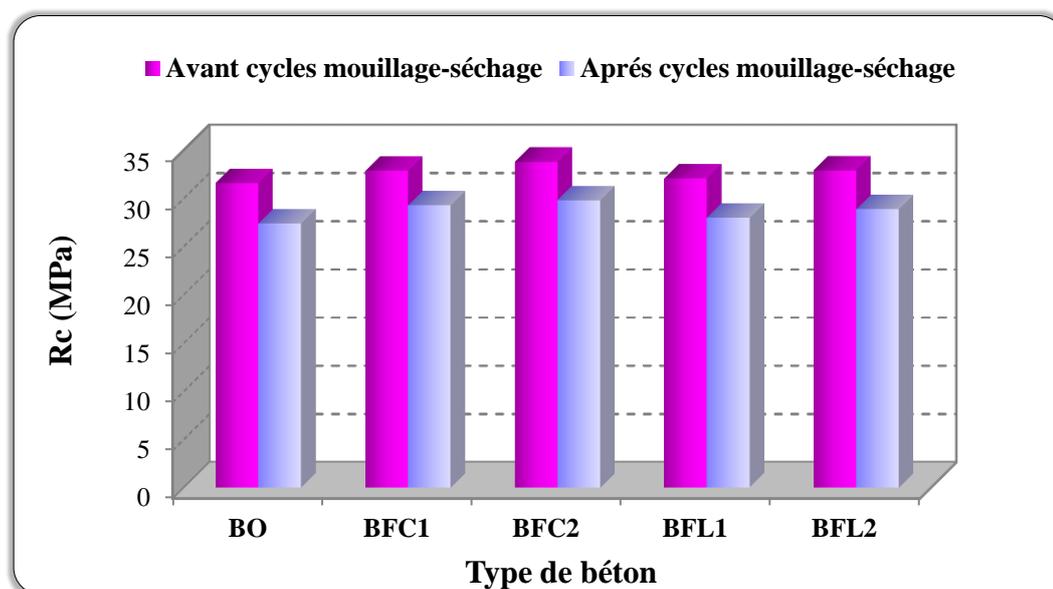


Figure (V-31) : Influence du mouillage-séchage sur la résistance à la compression pour différents types de béton.

D'après les résultats obtenus on observe d'une manière générale une diminution des résistances à la compression suite à l'essai mouillage-séchage et ceci quelque soit le type de béton. Cependant la composition BO de béton ordinaire semble présenter les mauvaises résistances avant et après l'essai mouillage-séchage.

Après cet essai de durabilité on constate que l'augmentation le dosage et la longueur de fibres métalliques agit favorablement sur les résistances. Sachant que la résistance de compression obtenue pour le béton ordinaire BO est de l'ordre 31,60 MPa.

On remarque que quelque soit le type du béton de fibres métalliques, la résistance obtenue suite aux essais mouillage-séchage reste plus proche a cette valeur, une légère diminution de la résistance à la compression de l'ordre de (10,91 à 11,86%) pour les bétons de fibres courtes, et de (12,77 à 12,29%) pour les bétons de fibres longues.

Cette observation montre que les fibres métalliques dans le béton sont influencées pas par l'effet de mouillage-séchage.

Tableau (V-20) : La variation des masses après l'essai mouillage-séchage.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
Absorption d'eau par cycles (%)	3,38	4,23	3,49	4,30	3,96
Taux de perte en masse τ_g (%)	1,87	1,38	1,59	1,43	1,47

Pendant les différents cycles de l'essai mouillage-séchage, les échantillons sont soumis à un mouvement d'eau, les variations en masse par cycle, sont plus remarquable pour le cas de béton sans fibres (témoin).

Les résultats montrent que l'augmentation du dosage et de longueur de fibres provoque une absorption d'eau importante ce qui confirme le rôle joué par les fibres de créés des pores dans les bétons, donc une porosité élevée ce qui engendre une augmentation de taux d'absorption d'eau pour le cas du béton fibrés. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés dans les mesures de la capacité d'absorption d'eau.

V.7.5.2 Essais gel-dégel ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$)

Les résultats de l'effet gel-dégel sur la résistance à la compression sont représentés au tableau V-21 et sur la figure V-32 (voir le paragraphe V.5.3.5.3).

Tableau (V-21) : Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression pour différents types du béton.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
R_{c28}^i (MPa) avant gel-dégel	31,60	32,85	33,81	32,06	32,91
R_{c28}^g (MPa) après gel-dégel	27,47	27,00	26,93	26,50	28,00
Perte en résistance λ_r^g (%)	13,08	17,81	20,34	17,34	14,92

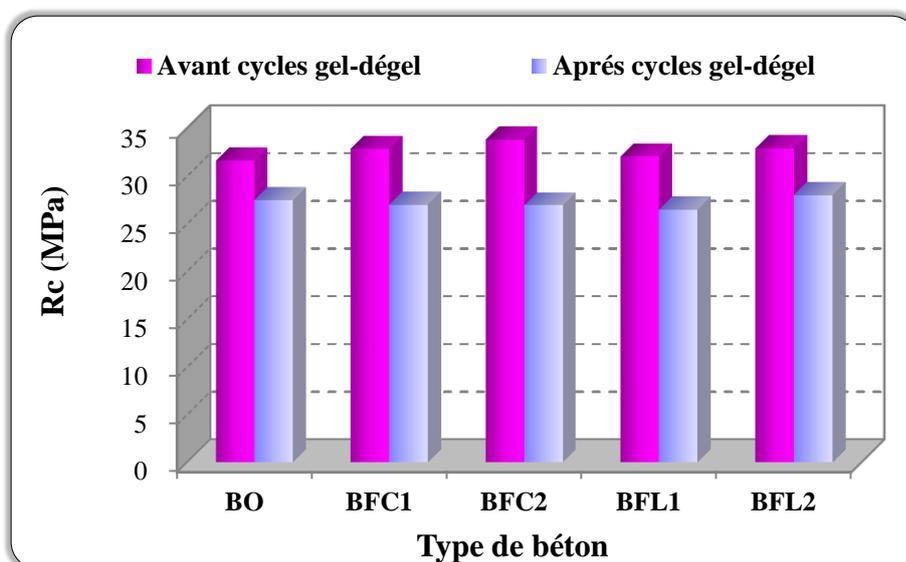


Figure (V-32) : Influence du gel-dégel sur la résistance à la compression pour différents types de béton.

La figure V-32 montre que l'effet de cet essai est d'autant plus remarquable pour le béton de fibres.

Cet effet peut être attribué par l'ajout de fibres métalliques dans le béton qui crée des pores aléatoires et irréguliers au sein de la matrice, ces pores sont remplis d'eau absorbée au moment d'essai, ceci est influencé sur la dégradation interne du béton par l'effet de cycles gel-dégel.

On observe le coefficient d'absorption d'eau par cycles est important pour les bétons de fibres (Tableau V-22) qui engendre des contraintes à l'intérieur du béton c'est-à-dire l'eau augmente de volume et provoque une pression hydraulique dans le réseau poreux qui conduit la dégradation interne.

Le risque de désordres est d'autant plus élevé que le degré de saturation en eau du béton est important qui est considéré aujourd'hui comme la cause principale des dégradations, cela conduit à la chute (perte) de résistance en compression de l'ordre de (17,81 à 20,34%) pour les bétons de fibres courtes, et de (17,34 à 14,92%) pour les bétons de fibres longues.

Par contre le béton ordinaire (sans fibres) paraît légèrement influencé par le gel-dégel. Ce dernier absorbe moins d'eau que le béton qui contient des fibres, d'où une diminution de résistance de l'ordre de (13,08%).

Tableau (V-22) : La variation des masses après l'essai gel-dégel.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
Absorption d'eau par cycles (%)	2,89	2,94	3,23	3,07	3,10
Taux de perte en masse τ_g (%)	0,31	0,26	0,12	0,11	0,10

Après cet essai de durabilité gel-dégel on constate que l'augmentation du dosage et en longueur de fibres métalliques provoque une nette diminution des taux de perte en masse.

V.7.5.3 Essais d'absorption d'eau par immersion (10x10x10 cm³)

Nous nous sommes intéressés à cette caractéristique afin de connaître le comportement des bétons renforcés de fibres métalliques en présence d'eau. En effet il est très important de quantifier la présence des vides dans le béton afin de prédire la compréhension des phénomènes d'éclatement du béton liés au gel.

Les valeurs de coefficient d'absorption d'eau A_b pour différents types de bétons sont rapportées dans le tableau V-23, et illustré dans la figure V-33 (voir le paragraphe V.5.3.5.4.1) :

Tableau (V-23) : Résultats de coefficient d'absorption A_b pour différents types de béton.

Type de béton	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
A_b (%)	6,59	6,64	6,76	6,70	6,86

D'après les résultats obtenus, on constate que l'introduction des fibres dans le béton influe sur la porosité du béton.

Avec cette méthode on pourra déterminer la porosité totale, puisque l'eau absorbé est logée dans les pores du matériau. Le volume d'eau absorbé jusqu' à saturation est égal, donc, au volume des pores existant dans le matériau.

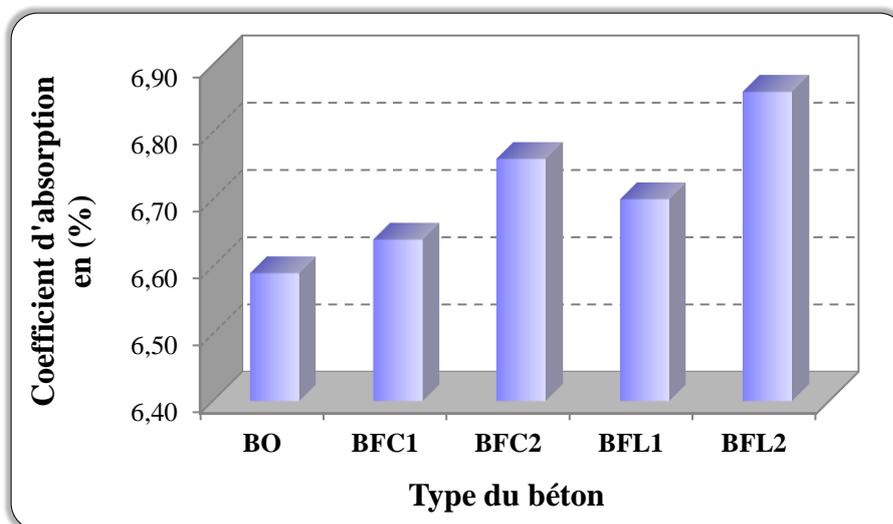


Figure (V-33) : Evolution de coefficient d'absorption pour différents types de béton.

La figure V-33 illustre l'évolution du coefficient d'absorption d'eau pour différents types du béton, il est nettement et visible que le coefficient d'absorption augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage et de longueur des fibres métalliques, ce qui confirme bien l'augmentation de la porosité.

Cette augmentation de porosité est liée à l'enchevêtrement des fibres, qui crée des vides dans la matrice.

Le pourcentage d'absorption d'eau après 24 heures d'immersion est de l'ordre de 6,59 % pour le béton témoin (BO), et accroît pour les bétons de fibres en fonction du dosage et de longueur arrivant à (6,64 - 6,76%) pour le béton qui contient de 0,5 à 1% de fibres courtes, (6,70 - 6,86%) pour le béton qui contient de 0,5 à 1% de fibres longues.

V.7.5.4 Essais d'absorption d'eau par capillarité (7x7x28 cm³)

Une absorption d'eau par le béton trop importante peut causer un certain nombre de désordres sur les structures, notamment l'écaillage du matériau après exposition au gel-dégel et la corrosion des armatures après pénétration des ions chlore.

Les résultats des essais d'absorption d'eau par capillarité sont représentés dans le tableau V-24 et illustré sur la figure V-34. Pour les différents types des bétons.

Tableau (V-24) : Résultats de l'absorption d'eau par capillarité pour différents types des bétons en (gr/cm²).

Temps (min)	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,66	0,96	1,21	1,44	1,70
20	0,75	1,04	1,31	1,52	1,79
30	0,82	1,12	1,38	1,58	2,03
40	0,89	1,19	1,44	1,64	2,09
50	0,95	1,24	1,50	1,70	2,14
60	1,01	1,29	1,63	1,75	2,19
70	1,07	1,34	1,67	1,79	2,23
80	1,12	1,37	1,72	1,83	2,28
90	1,17	1,41	1,76	1,88	2,32

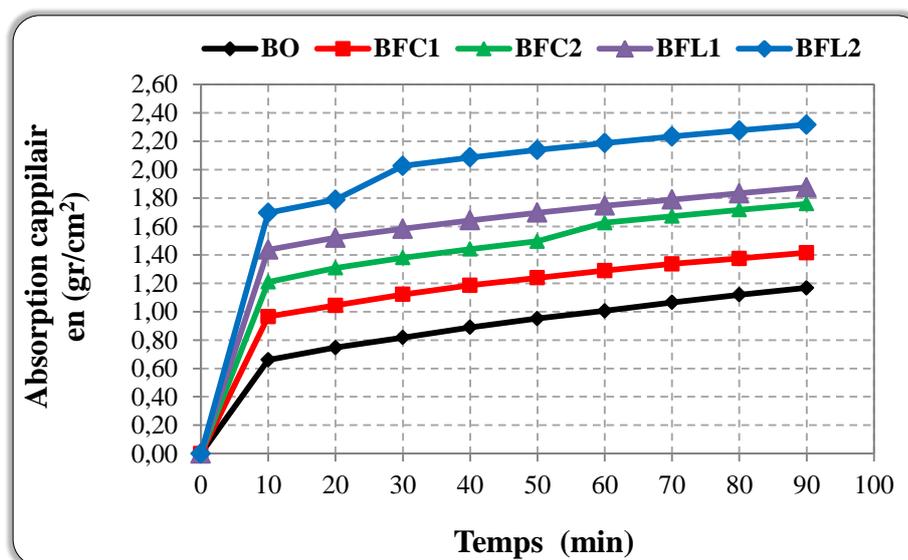


Figure (V-34) : Evolution de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps pour différents type de béton.

D'après la figure V-34 on remarque que l'allure d'absorption d'eau a la même cinétique pour tous les bétons.

Il est nettement visible que l'absorption d'eau par capillarité augmente en fonction du temps. Ceci est observé pour tous les types du béton surtout pour les bétons qui contiennent des fibres métalliques.

Cette augmentation est progressive et proportionnelle avec le dosage et de longueur de fibres métalliques incorporées dans le béton, la valeur maximale de l'absorption d'eau est $2,32\text{gr/cm}^2$ correspondante à la longueur de fibre $L_f = 50\text{ mm}$ avec un dosage $V_f = 1\%$ (BFL2). Cette valeur est relativement supérieure par rapport au béton sans fibres BO, la différence est de l'ordre de 98,36 %.

En fonction du temps, l'absorption par capillarité est très rapide au début. Mais par la suite elle tend progressivement à se stabiliser. Ceci a été remarqué pour toutes les compositions étudiées.

On peut conclure que les fibres métalliques amplifient la capacité d'absorption d'eau du béton, augmente avec l'augmentation de dosage et de longueur de fibres. Ainsi l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

V.7.6 Essais d'auscultations dynamiques (7x7x28 cm³)

La mesure du temps t de l'onde longitudinale du son est effectuée dans le but de calculer plusieurs paramètres qui donnent une idée sur la caractérisation des matériaux (voir les paragraphes V.5.3.6.1- V.5.3.6.2), les résultats de ces paramètres sont indiqués sur le tableau V-25, et schématisés sur les figures V-35, V-36, et V-37.

Tableau (V-25) : Résultats d'essai d'auscultation dynamique pour différents types de béton.

Paramètres	Age (jours)	BO	BFC1	BFC2	BFL1	BFL2
Vitesse de propagation V (m/sec)	7	4426	4389	4346	4355	4359
	14	4519	4504	4476	4475	4442
	28	4633	4583	4581	4573	4504
	90	4740	4610	4595	4585	4548
Module d'élasticité dynamique E_d (MPa)	7	39921	39367	38855	38860	39438
	14	41612	41464	41210	41044	40956
	28	43751	42923	43175	42855	42104
	90	45799	43445	43445	43089	42929
Résistance à la compression R_c (MPa)	7	23,13	23,03	22,93	22,93	23,04
	14	23,46	23,43	23,38	23,35	23,33
	28	23,87	23,71	23,76	23,69	23,55
	90	24,27	23,81	23,81	23,74	23,71

V.7.6.1 Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (Tableau V-25)

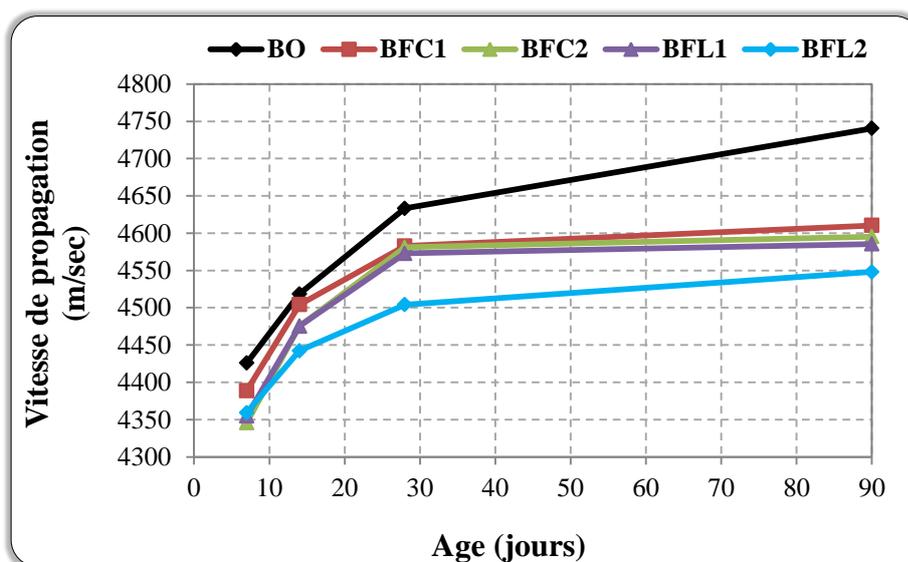


Figure (V-35) : Evolution de la vitesse de propagation du son en fonction du temps pour différents types du béton.

La figure V-35 montre que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques augmente en fonction du temps pour toutes les compositions.

On remarque que la cinétique d'évolution de vitesse des ondes ultrasoniques est la même pour tous les bétons jusqu' à 28 jours, après une longue durée, l'action des fibres est plus précise. Car les bétons de fibres se stabilisent que le béton témoin (BO).

L'introduction des fibres métalliques dans le béton diminue la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques par rapport au béton sans fibres. Une diminution de ces vitesses à l'âge de 90 jours pour un ajout de 0,5 à 1% de fibres courtes de l'ordre de (2,74 à 3,06%), et (3,27 à 4,06%) pour un ajout de 0,5 à 1% de fibres longues.

Cette diminution de la vitesse, peut expliquer du fait de l'allongement de temps de propagation du son dans la masse du béton. La présence des fibres métalliques lui font parcourir un chemin plus long. Cette constatation déjà marqué par d'autres chercheurs, BEN YAHIA Abdeslam (2001) [30] et RICHANE Saci (2004) [105].

Donc on peut dire que l'ajout de fibres métalliques perturbé les résultats de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, mais ces résultats reste toujours une meilleure performance. C'est à dire la qualité du béton en fonction de ces vitesses est bonne [Annexe 6].

V.7.6.2 Module d'élasticité dynamique E_d (Tableau V-25)

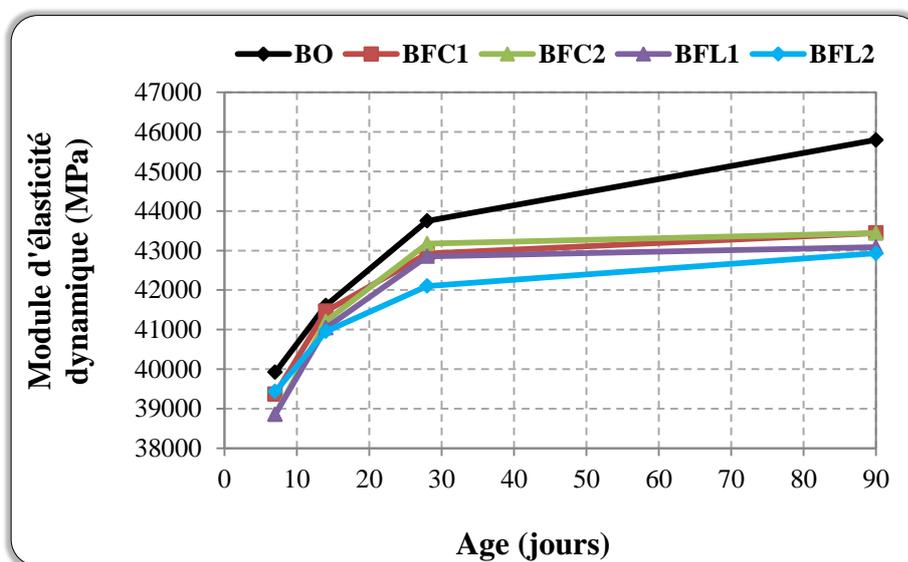


Figure (V-36) : Evolution du module d'élasticité dynamique E_d en fonction du temps pour différents types du béton.

V.7.6.3 Résistance à la compression (Tableau V-25)

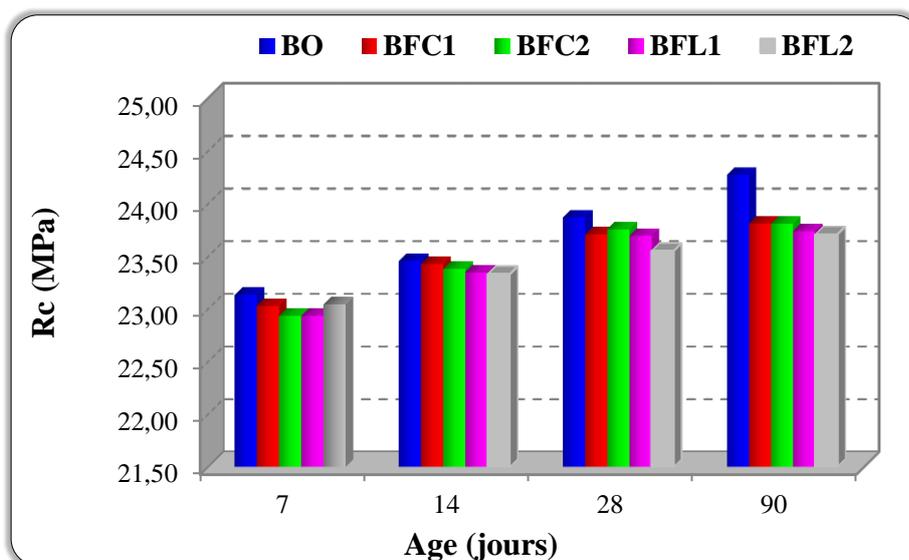


Figure (V-37) : Variation de résistance à la compression en fonction de l'âge d'essai pour différents types des bétons.

Le module d'élasticité dynamique a la même cinétique que la vitesse des ondes.

D'après la figure V-36, on remarque que le module d'élasticité dynamique diminue avec l'augmentation du dosage et de longueur de fibres métalliques. Cela est dû à l'augmentation des vides dans le béton à cause l'enchevêtrement des fibres introduites d'une part, et de l'évaporation rapide de l'eau de gâchage d'autre part, qui influent aussi sur la formation des hydrates de ciments et par conséquent on obtient un matériau moins compact, par conséquent une diminution de la rigidité totale du béton.

La même constatation pour la figure V-37 concerné à la variation de résistance en compression, on remarque que la résistance diminué légèrement en fonction du dosage et de longueur de fibres métalliques. Cette diminution est liée essentiellement à la porosité provoquée par l'ajout de fibres, et diminué aussi par présence de fibres métalliques lui-même, car la présence d'armature (fibres métalliques) dans le béton à un effet appréciable sur la vitesse des impulsions.

" Et enfin on peut dire que les résistances mécaniques en compression à partir de 28 jours déterminées par l'ultrason sont inférieures à celles déterminées par presse hydraulique pour différents types du béton. Ce qui reflète que les essais destructifs est plus adopté au cas des bétons de fibres métalliques durcis".

V.7.7 Résultats du comportement de flexion sur des poutres armées

Dans cette partie seront présentés les résultats de l'étude expérimentale : modes de rupture observés, courbes charge-flèche, évolution et ouverture des fissures.

V.7.7.1 Flèche et ouverture de fissure des poutres

Tableau (V-26) : Résultats de la flèche et ouverture de fissure pour les différents types de poutre.

Flèche et ouverture de fissure mesurée										
Force (KN)	PBO Avec At		PBFC2 sans At		PBFC2 avec At		PBFL2 sans At		PBFL2 avec At	
	f	w	f	w	f	w	f	w	f	w
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0,55	-	0,36	-	0,09	-	-	-	-	-
12	0,86	-	0,59	-	0,24	-	0,15	-	0,11	-
16	1,40	-	0,92	-	0,43	-	0,38	-	0,31	-
20	1,80	-	1,20	-	0,73	-	0,65	-	0,59	-
24	2,20	0,60	1,50	-	1,03	-	0,95	-	0,75	-
28	2,98	0,80	1,94	0,75	1,30	-	1,28	-	1,22	-
32	3,25	1,10	2,25	1,40	1,75	-	1,58	0,90	1,51	-
36	3,66	1,40	2,63	1,90	2,10	0,35	1,91	1,50	1,86	-
40	4,12	1,90	3,00	2,40	2,45	0,60	2,20	2,20	2,16	-
44	4,81	2,35	3,40	2,95	2,85	0,95	2,65	2,55	2,50	0,40
48	5,60	2,70	-	-	3,25	1,20	3,10	2,90	2,90	0,60
52	5,80	3,20	-	-	3,80	1,80	-	-	3,30	0,85
56	-	-	-	-	4,18	2,53	-	-	3,65	1,30
60	-	-	-	-	-	-	-	-	4,05	1,90
64	-	-	-	-	-	-	-	-	4,50	2,45

f : Flèche mesurée en (mm).
w : Ouverture de fissure mesurée en (mm).

PBO avec At

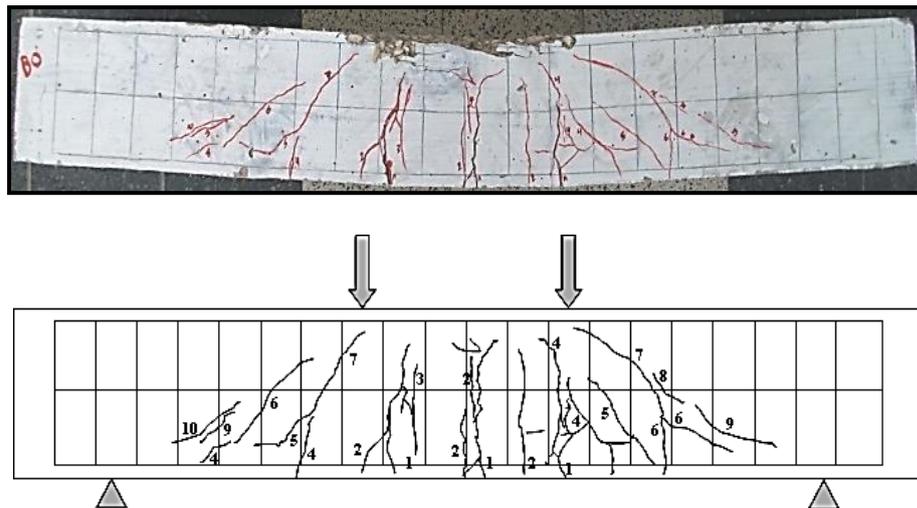


Figure (V-38) : Destruction et fissuration finale de la poutre PBO avec At.

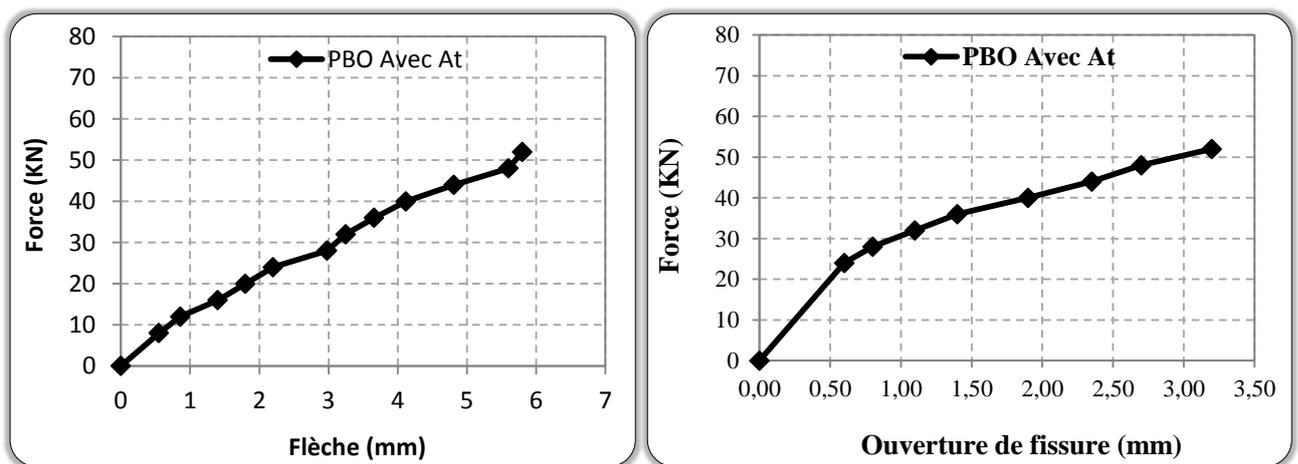


Figure (V-39) : Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre témoin PBO avec At.

Les courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre témoin PBO avec At sont données dans la figure V-39. Ces courbes montrent qu'il y a trois phases à caractériser :

- 1^{ère} phase, la flèche croît linéairement avec la charge. Cette phase s'étend jusqu'à 24 kN avec l'apparition de micro fissures verticales ascendantes en milieu de la poutre, la flèche atteinte est d'environ 2,20 mm, et l'ouverture de fissure de l'ordre 0,6 mm.

- 2^{ème} phase " début de fissuration ", Avec la progression du chargement, l'ouverture des fissures s'élargit et d'autres fissures obliques font leurs apparitions. On peut constater l'apparition de fissures inclinées à $F= 40$ KN. La flèche atteinte est de 4,12 mm environ, avec une évolution de la largeur de fissure de l'ordre 1,90 mm.
- 3^{ème} phase " béton armé se fissuré phase plastique " après cette phase plastique des aciers, on note une nette augmentation de la profondeur et la propagation d'ouverture de fissures inclinées. la poutre se détruit dans la zone comprimée située entre les deux points d'application de la charge. La flèche mesurée à mi-travée est de 5,80 mm et la charge de rupture (par flexion) est de 52 KN, avec une ouverture de fissure de l'ordre de 3,20 mm.

PBFC2 sans At

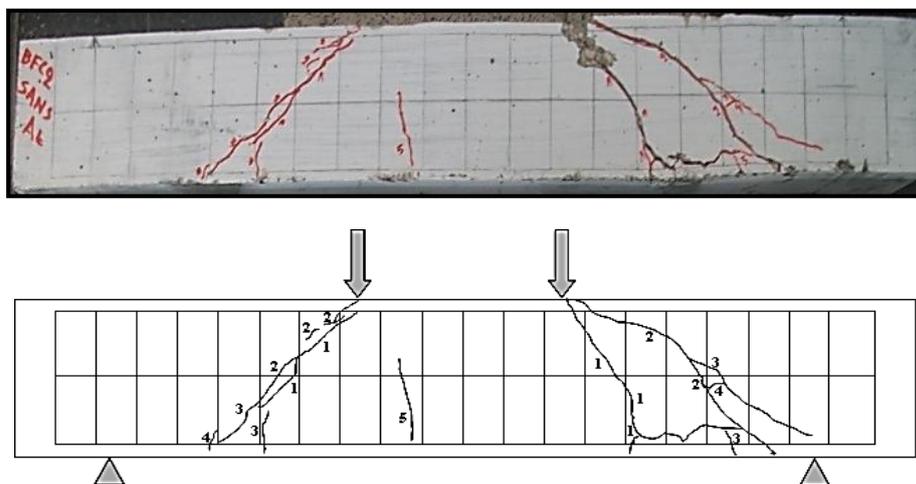


Figure (V-40) : Destruction et fissuration finale de la poutre PBFC2 sans At.

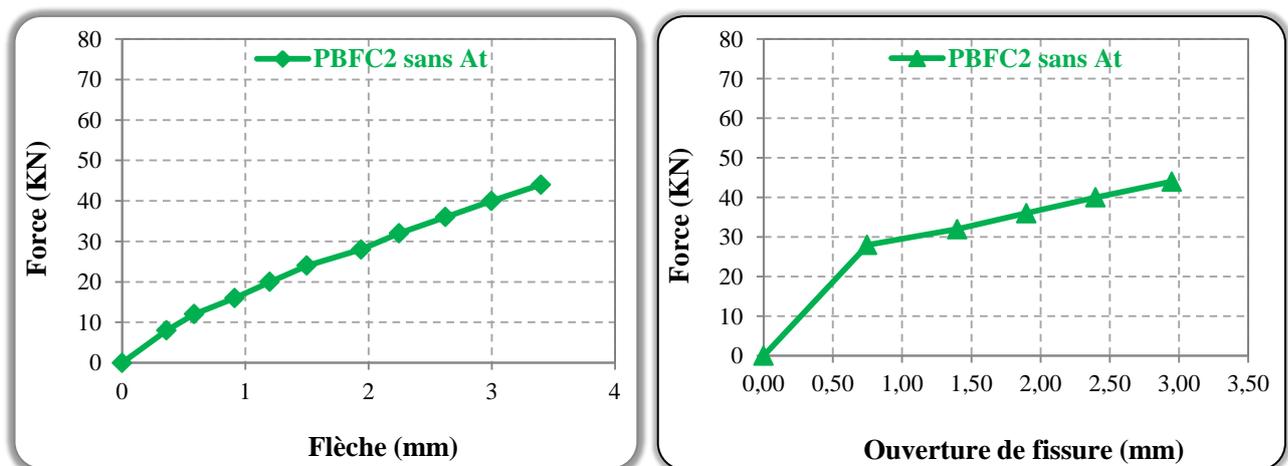


Figure (V-41) : Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 sans At.

Les courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 sans At sont données dans la figure V-41. Ces courbes montrent qu'il y a deux phases à caractériser :

- 1^{ère} phase " béton armé non fissuré ", la poutre reste presque intacte où aucune fissure n'apparaît, cette phase s'étend jusqu'à 28 KN avec l'apparition de premières fissures fines en diagonale auprès des appuis (effort tranchant), la flèche atteinte est d'environ 1,94 mm, et l'ouverture de fissure correspond à cette charge est de l'ordre de 0,75 mm.
- 2^{ème} phase " béton armé fissuré ", on note une nette augmentation de la profondeur et de la propagation de l'ouverture des fissures inclinées sur les deux côtés de la poutre (où l'effort tranchant est maximum). La flèche mesurée à mi-travée est de 3,40 mm et la charge de rupture est de 44 KN, avec une ouverture de fissure de l'ordre de 2,95 mm.

PBFL2 sans At

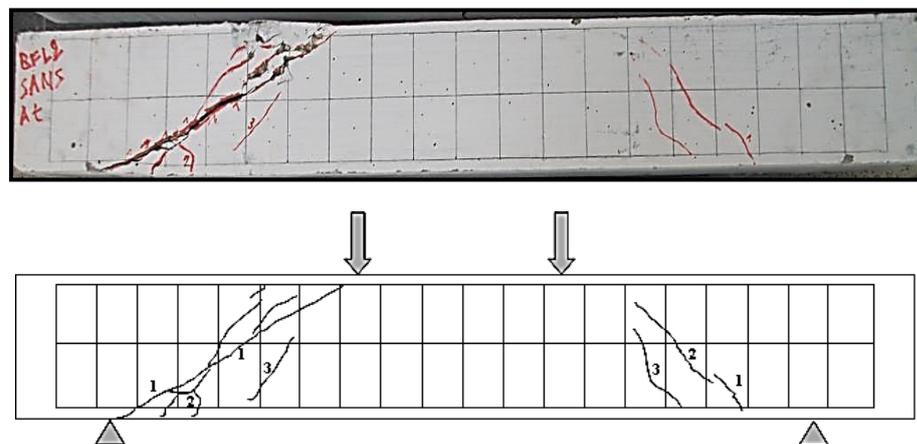


Figure (V-42) : Destruction et fissuration finale de la poutre PBFL2 sans At.

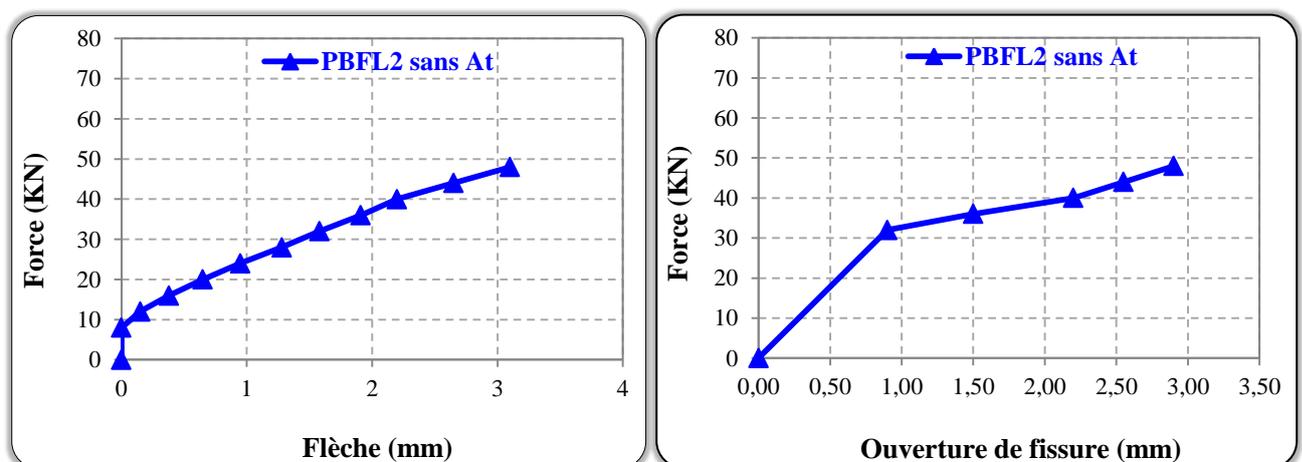


Figure (V-43) : Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFL2 sans At.

Les courbes expérimentales des flèches et ouverture des fissures obtenues sur les deux poutres PBFC2 et PBFL2 sans armatures transversales sont pratiquement identiques, malgré que les fibres métalliques sont différentes.

- 1^{ère} phase " béton armé non fissuré ", linéaire- parabole, cette phase s'étend jusqu'à 32 KN avec l'apparition de fissures fines en diagonale auprès des appuis (effort tranchant), la flèche atteinte est d'environ 1,58 mm, et l'ouverture de fissure de l'ordre de 0,90 mm.
- 2^{ème} phase " béton armé fissuré ", on note une nette augmentation de la profondeur et de la propagation de l'ouverture des fissures inclinées. La flèche mesurée à mi-travée est de 2,95 mm et la charge de rupture (par effort tranchant) est de 48 KN, avec une ouverture de fissure de l'ordre de 2,90 mm.

Les courbes de la figure V-40, V-42 illustre l'importance des cadres (At) dans le comportement à la flexion des poutres en béton armé. Les évolutions des flèches et mode de rupture sont semblables entre les deux poutres jusqu'à la ruine.

Tableau (V-27) : Différentes phases de comportement en flexion des poutres étudié et le gain de capacité portante.

Poutres	1 ^{ère} phase				2 ^{ème} phase				3 ^{ème} phase			
	F	f	w	g	F	f	w	g	F	f	w	g
PBO avec At	24	2,2	0,6	/	40	4,12	1,90	/	52	5,80	3,20	/
PBFC2 sansAt	28	1,94	0,75	17	44	3,40	2,95	10	-	-	-	-
PBFL2 sansAt	32	1,58	0,90	33	48	2,95	2,90	20	-	-	-	-
PBFC2 avecAt	-	-	-	-	36	2,1	0,35	50	56	4,18	2,53	40
PBFL2 avecAt	-	-	-	-	44	2,50	0,40	83	64	4,50	2,45	60

F : Force en (KN).
f : Flèche mesurée en (mm).
w : Ouverture de fissure mesurée en (mm).
g : Le gain de capacité portante des poutres en (%).

Nous remarquons que les poutres avec fibres courtes (PBFC2) et fibres longues (PBFL2), leur comportement est le même du point de vue flèche et ouverture de fissure néanmoins une légère amélioration dans le comportement mécanique dans la 1^{ère} phase par rapport aux poutres PBO avec At qui est de l'ordre de 17,00% pour le PBFC2, et 33,00% pour le PBFL2.

L'inexistence des fissures dans la partie centrale s'explique par le fait qu'il y a une bonne couture dans la matrice avec les fibres, ou l'effort tranchant est faible. Le moment fléchissant est repris par les armatures inférieures. Des fissures obliques ont tendances à se faire apparaître au fur et à mesure de l'augmentation de la force aux extrémités près des appuis au l'effort tranchant est assez important. Les fissures obliques, qui apparaissent au niveau des appuis, c'est le résultat de manques d'armatures de coutures (armatures transversales dans les deux poutres PBFC2 et PBFL2).

PBFC2 avec At

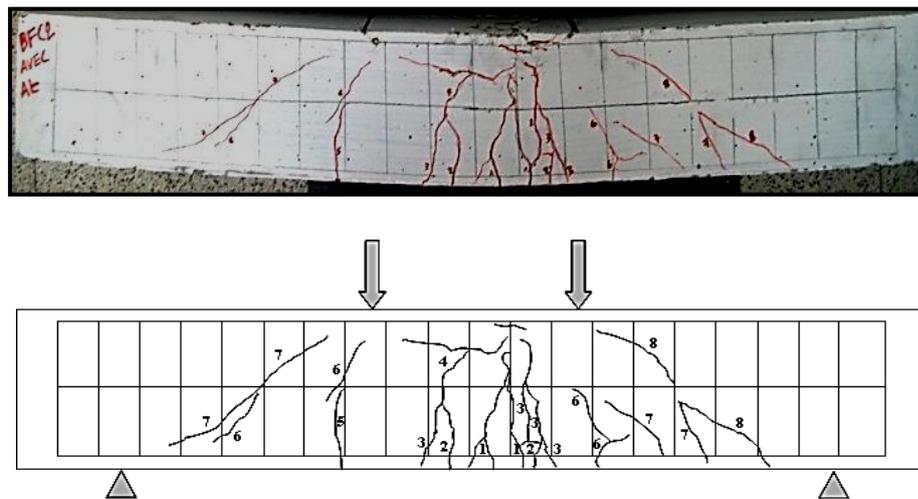


Figure (V-44) : Destruction et fissuration finale de la poutre PBFC2 avec At.

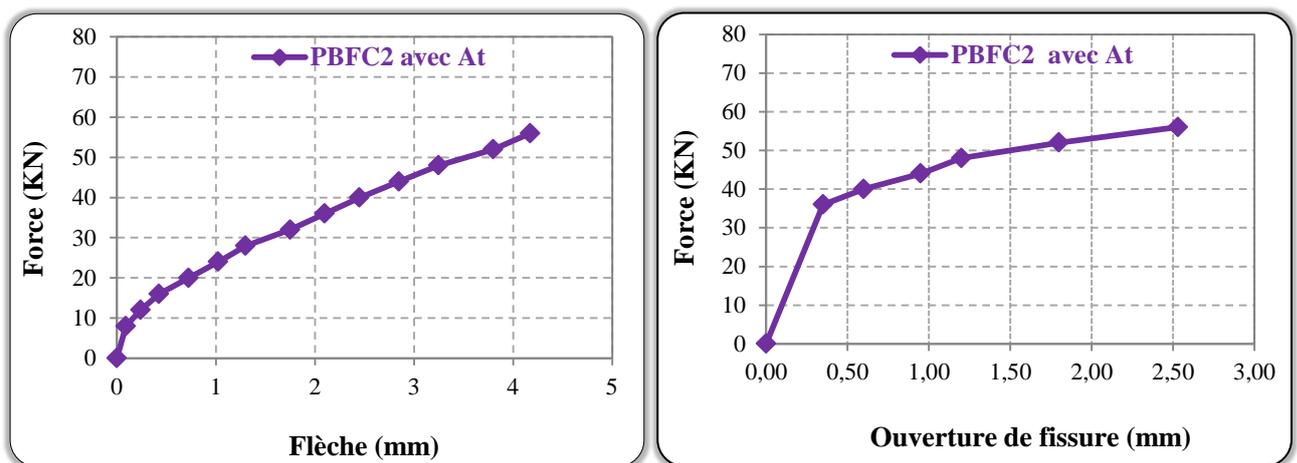


Figure (V-45) : Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 avec At.

Les courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFC2 avec At sont données dans la figure V-45. Ces courbes montrent qu'il y a trois phases à caractériser :

- La première phase correspond au comportement élastique. La charge n'entraîne pas de fissuration du béton tendu.
- La seconde phase commence avec l'apparition des fissures verticales de flexion au centre de poutre, Cette phase s'étend jusqu'à 36 KN avec l'apparition de fissures fines verticales ascendantes, la flèche atteinte est d'environ 2,10 mm, et l'ouverture de fissure mesuré est de l'ordre de 0,35 mm.
- Une phase de " béton armé fissuré plastique " Au cours de l'augmentation de chargement, la fissure de flexion s'incline devenant une fissure diagonale. La fissure diagonale se développe et se propage vers les points de chargement. Après la formation de la fissure diagonale. La flèche mesurée à mi-travée est de 4,18 mm et la charge de rupture (par flexion) est de 56 KN, avec une ouverture de fissure de l'ordre de 2,53 mm.

PBFL2 avec At

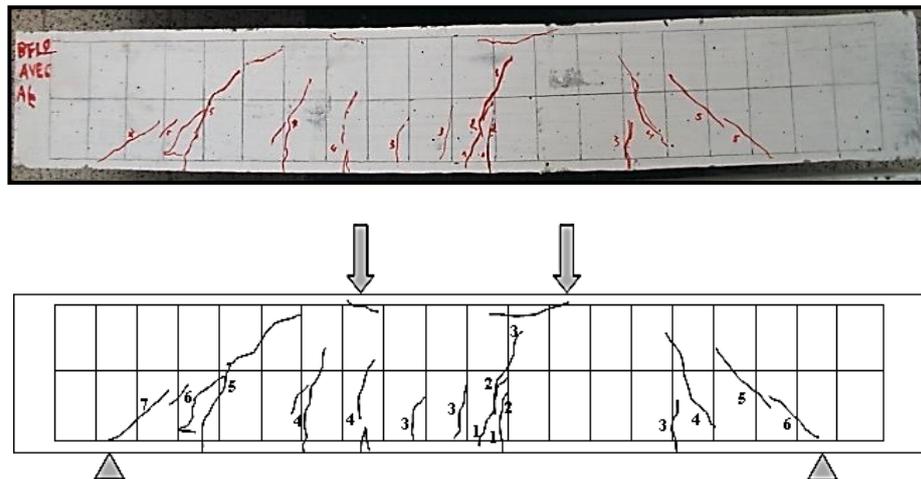


Figure (V-46) : Destruction et fissuration finale de la poutre PBFL2 avec At.

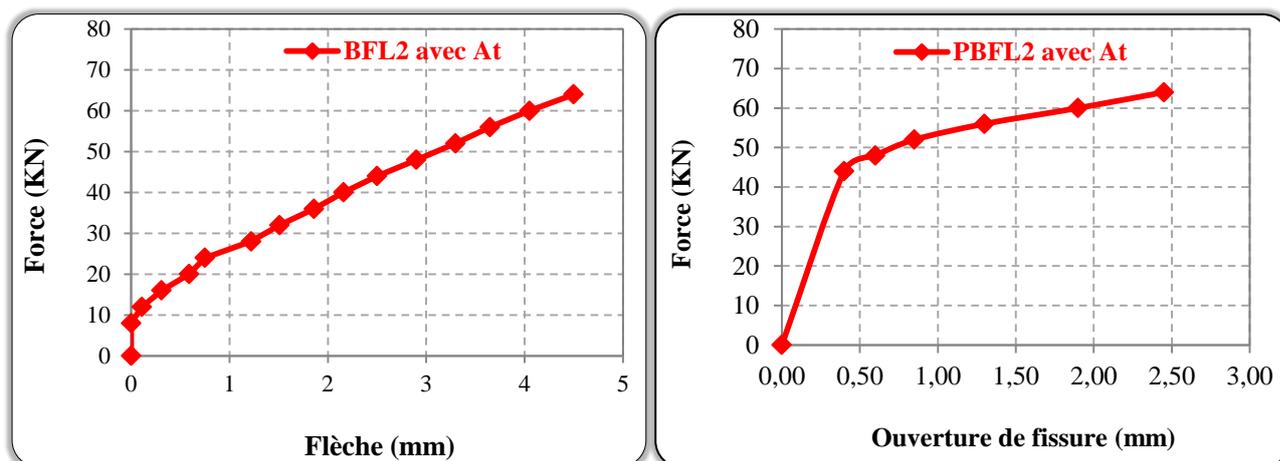


Figure (V-47) : Courbes (force-flèche) et (force-ouverture de fissure) de la poutre PBFL2 avec At.

Dans les deux poutres PBFC2 et PBFL2, on place des armatures transversales (cadres).

- Durant la première phase (élastique) aucune fissure n'apparaît, l'acier et le béton subissent les mêmes déformations.
- La seconde phase commence l'apparition des fissures verticales de flexion au centre de poutre, Cette phase s'étend jusqu'à 44 KN avec l'apparition de fissures fines verticales ascendantes, la flèche atteinte est d'environ 2,50 mm, et l'ouverture de fissure mesurée est de l'ordre de 0,40 mm.
- En 3^{ème} phase le " béton armé se fissuré " avec l'augmentation du chargement, la fissure de flexion s'incline devenant une fissure diagonale. La fissure diagonale se développe et se propage vers les points de chargement. Après la formation de la fissure diagonale. La flèche mesurée à mi-travée est de 4,50 mm et la charge de rupture (par flexion) est de 64 KN, avec une ouverture de fissure de l'ordre de 2,45 mm.

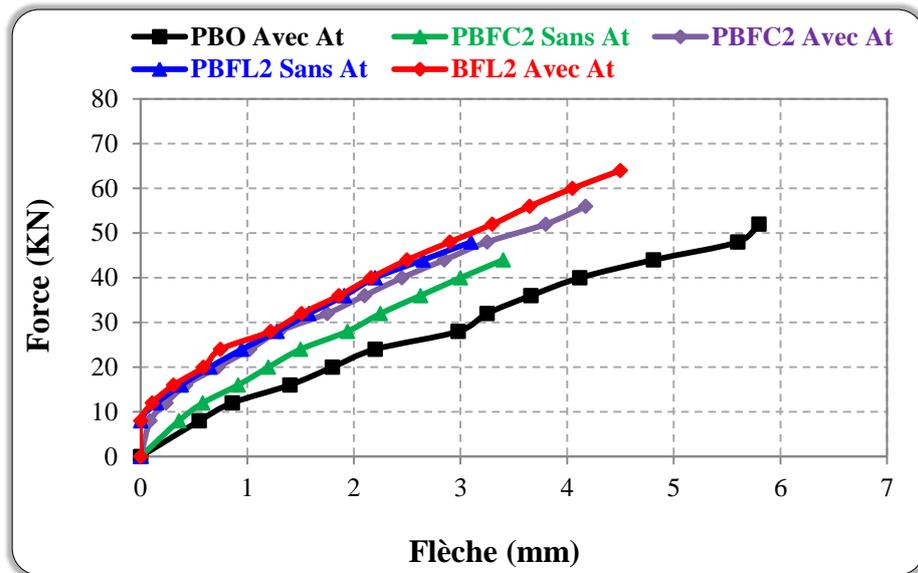


Figure (V-48) : Courbes force - flèche à mi-travée pour différents types de poutres.

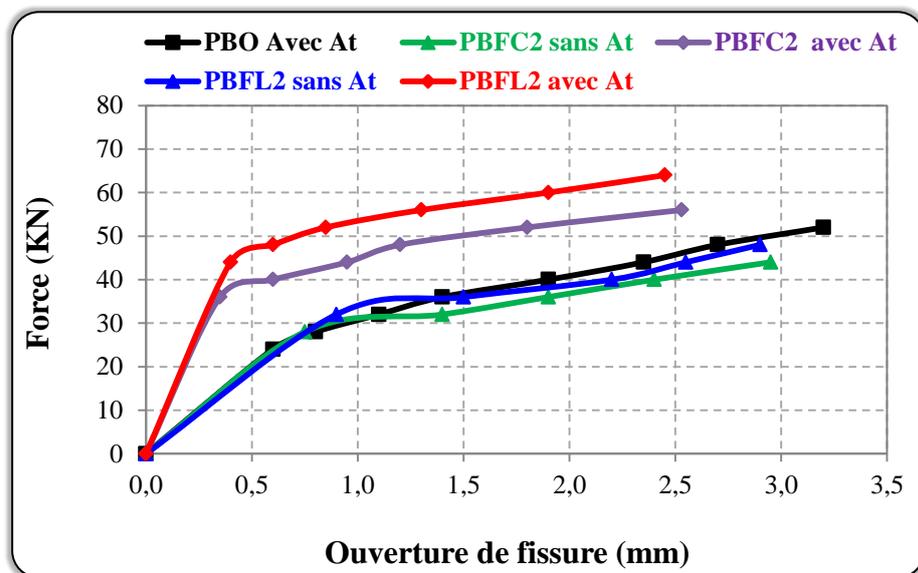


Figure (V-49) : Courbes force - ouverture de la fissure pour différents types de poutres.

La figure V-48 montre l'évolution de la flèche en fonction de la charge pour tous les spécimens, on constate la capacité portante des poutres en béton de fibres est supérieure à la capacité portante des poutres en béton sans fibres.

A partir de ce graphe, on remarque que les flèches des poutres renforcées de fibres sont plus petites que celles des poutres témoins. Cette diminution est due à la présence des fibres pour les deux du modèles de renforcement (sans ou avec armatures transversales).

Néanmoins, on constate que pour les bétons de fibres courtes la flèche est sensiblement supérieure à celle obtenue avec les fibres longues.

Le tableau suivant, donne une idée claire sur l'importance et l'intérêt de fibres métalliques qui diminuent la flèche pour un chargement de 44 KN.

Tableau (V-28) : Taux de diminution de la flèche pour un chargement de 44 KN.

Flèche mesurée (mm)					
Force (KN)	PBO Avec At	PBFC2 sans At	PBFC2 avec At	PBFL2 sans At	PBFL2 avec At
44	4,81	3,40	2,85	2,65	2,50
Taux de diminution de la flèche en (%)					
	/	29,31	40,75	44,91	48,02

Pour la composition du béton de fibres utilisée, qui est une composition non fibrée, l'introduction des fibres métalliques conduit, par rapport au béton ordinaire, à une réduction considérable de la ductilité à la ruine des poutres en béton armé.

A partir de l'analyse de résultats précédente, nous pouvons effectuer les remarques suivantes :

- Les fibres améliorent la résistance à la rupture. Donc les fibres aident les armatures longitudinales.
- Les fibres diminuent la flèche. C'est-à-dire que le béton de fibres résiste à la traction mieux que le béton témoin (sans fibre).

La figure V-49 montre que les poutres renforcées de fibres métalliques PBFC2 et PBFL2 avec armature transversale présentent une apparition et une ouverture de fissure plus lente que les poutres avec fibres sans armature transversal.

V.7.7.2 Effort tranchant et moment fléchissant avec le mode de rupture

Selon la configuration de l'essai (flexion 4 points), le diagramme de l'effort tranchant et du moment fléchissant expérimental sont représentés sur les figures V-50 pour toutes les poutres.

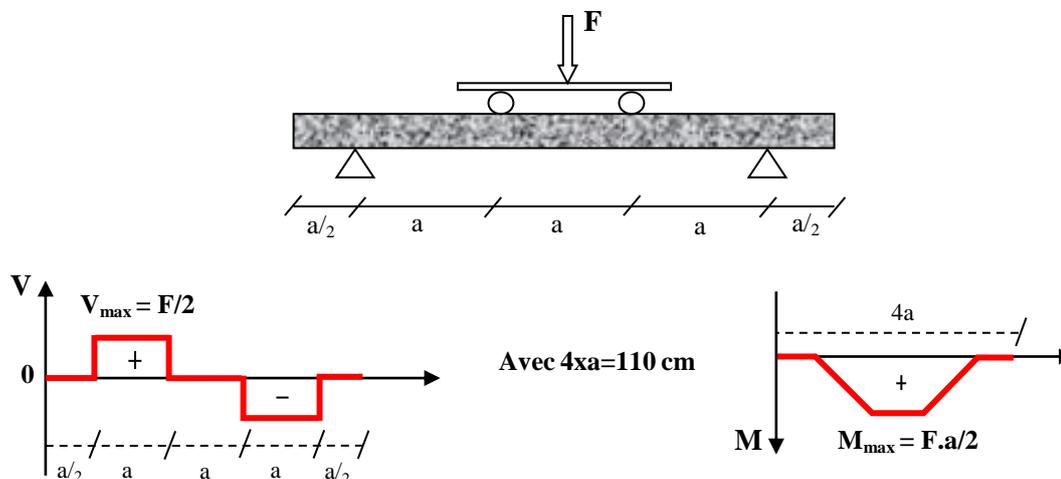


Figure (V-50) : Diagrammes de l'effort tranchant et du moment fléchissant d'une poutre soumise à la flexion 4 points.

Tableau (V-29) : Résultats de l'effort tranchant et le moment fléchissant avec le mode de rupture observé pour les différents types de poutres.

Poutres	f_{c28} (MPa)	f_{t28} (MPa)	F_{rup} (KN)	V_{exp} (KN)	M_{exp} (KN.m)	M_{th} (KN.m)	Mode de rupture
PBO avec At	31	3,08	52	26	7,15	6,65	Rupture par flexion
PBFC2 sans At	33	3,83	44	22	6,05	6,69	Rupture par effort tranchant
PBFC2 avec At	33	3,83	56	28	7,70	6,69	Rupture par flexion
PBFL2 sans At	34	4,12	48	24	6,60	6,71	Rupture par effort tranchant
PBFL2 avec At	34	4,12	64	32	8,80	6,71	Rupture par flexion

F_{rup} : Force à la rupture.

V_{exp} : Effort tranchant expérimental. $V_{exp} = \frac{F}{2}$

M_{exp} : Moment fléchissant expérimental. $M_{exp} = \frac{F.a}{2}$

M_{th} : Moment fléchissant théorique (voir le paragraphe V.5.3.7.4).

Nous avons choisis, dans cette étude de vérifier, la performance du béton de fibres, et si possible remplacer le béton armé par le béton de fibres métalliques ; en totalité, si non une partie des armatures transversales, par des fibres métalliques.

D'après les résultats obtenus dans le tableau V-28, on peut noter les remarques suivantes :

- Dans le cas des poutres fabriquées sans armatures transversales, le dosage et le type de fibres utilisées n'a pas permis d'augmenter l'effort tranchant et le moment fléchissant expérimental à la rupture par rapport aux poutres témoins et n'a pu entraîner de modification du mode de ruine. C'est -à- dire la destruction de ces poutres comme prévue (rupture par effort tranchant). Ce constat traduit donc que la substitution totale des armatures transversales par ce type de fibres et pour la quantité utilisée n'est pas efficace. Une diminution de l'effort tranchant expérimental pour les poutres fabriquées en béton de fibres courtes et longues sans armature transversal par rapport la poutre témoin est respectivement 15%, 8%.
- Dans le cas des poutres préparées avec armatures transversales, on remarque une augmentation appréciable au niveau de l'effort tranchant et le moment fléchissant expérimental pour les spécimens fabriqués en fibres courtes ou longues par rapport aux spécimens témoins. Cette augmentation est liée par la présence des fibres métalliques qui augmente la capacité portante et la rigidité des poutres.
- A partir de la force de rupture, la contribution des fibres longues est mise en évidence par la courbe (effort- flèche). Les fibres longues ont pour rôle de renforcer le comportement du béton vis-à-vis la flexion surtout à la rupture. (la ductilité est améliorée), c'est-à-dire on peut utiliser les fibres métalliques comme armature complémentaire de poutres en béton armé soumises à la sollicitation de flexion importante.

V.8 Conclusion

Cette partie est consacrée essentiellement à l'optimisation du béton de structure à base de sable de dune, puis à l'étude de renforcement de ce béton par des fibrés métalliques.

A la lumière des résultats obtenus pour les essais réalisés dans le cadre de cette recherche nous a permis d'extraire un certains nombres de points :

- ❖ L'étude de maniabilité du béton frais renforcé de fibres, a montré que celle-ci diminue lorsque le dosage et la longueur de fibres augmente. Pour un pourcentage de fibres maximal de 1%, le meilleur est obtenu lorsqu'on rajoute 0,3% du poids de ciment de super plastifiant.
- ❖ Du point de vue maniabilité et compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire aux gros granulats.
- ❖ L'ajout de fibres métalliques induit une augmentation de masse volumique apparente pour les deux états frais et durcie par rapport à celle du béton sans fibres.
- ❖ Les résistances en compression et en flexion de béton de fibres métalliques sont nettement supérieures à celles d'un béton sans fibres (notamment en flexion).
- ❖ Le dosage et l'élancement de fibres métalliques semblent être les facteurs les plus importants qui diminuent le retrait de séchage et le retrait endogène.
- ❖ La perte en poids est plus importante par la présence des fibres métalliques.
- ❖ Une perte de résistance à la compression plus remarquable sous l'effet de (mouillage-séchage) pour le béton ordinaire (BO) par rapport aux autres bétons fibrés. Cela se traduit par l'ajout de fibres métalliques dans le béton.
- ❖ Une sensibilité du béton de fibres plus importante aux effets de vieillissement (gel-dégel) par rapport au béton ordinaire (BO), cela se traduit par la présence des pores aléatoires dans le béton fibrés, ces pores sont remplis d'eau au moment d'essai qui crée des contraintes intérieures, ceci conduit à la chute et perte de résistance à la compression.
- ❖ La porosité du béton de fibres est supérieure par rapport au béton seul (sans fibres).
- ❖ L'absorption d'eau par capillarité augmente en fonction de l'augmentation du dosage et de longueur de fibres métalliques.
- ❖ La vitesse de propagation du son dans le béton augmente avec l'augmentation de l'âge du béton quelque soit le type de béton.

- ❖ La vitesse de propagation du son dans le béton est diminuée avec l'augmentation du dosage et de longueur fibres métalliques.
- ❖ Les résistances déterminées par la presse sont supérieures à celles déterminées par l'ultrason à partir de 28 jours pour tous les bétons. Ce qui reflète que les essais destructifs est plus adopté au cas des bétons de fibres métalliques durcis.
- ❖ Les fibres ne peuvent pas remplacer entièrement les armatures transversales pour les cas des éléments (poutres) sont soumis à un effort tranchant très important.
- ❖ En présence d'armatures transversales, les fibres métalliques on peut utiliser comme armature complémentaire de poutres en béton armé soumises à la sollicitation de flexion importante.

***CONCLUSION GÉNÉRALE ET
RECOMMANDATIONS***

Conclusion générale et recommandations

Ce travail de mémoire porte essentiellement sur la valorisation des matériaux locaux dans la formulation d'un béton de structure. Les matériaux valorisés sont le sable de dune qui se trouve en très grandes quantités dans la région de Laghouat ainsi que dans d'autres régions du pays, notamment dans le sud algérien, et les déchets récupérés sur chantiers "chutes de fil d'attache", comme les fibres métalliques pour renforcer ce type de béton.

Ce travail de recherche est présenté en deux parties :

Dans la première partie, nous avons présenté la recherche bibliographique qui a porté à la fois sur le comportement mécanique de béton renforcé en plusieurs types de fibres et sur l'utilisation du sable de dune en Génie Civil notamment dans la formulation du béton. Dans ce sens, on note que :

- ✓ Une gamme très variée de fibres susceptibles d'être utilisés comme renfort des matrices cimentaires, qui se différencient par leur nature, leur forme, leur diamètre, leur longueur. Elles possèdent des caractéristiques physiques et mécaniques différentes les unes des autres.
- ✓ En revanche, le béton de sable de dune semble avoir un grand avenir dans certains domaines, les avantages techniques et économiques des bétons en laissent prévoir un développement important pour le futur.

Dans la deuxième partie. Une étude expérimentale a été menée sur des bétons préparés à partir de sable de dune corrigé par un sable d'oued et renforcé par des fibres métalliques. Elle comporte deux volets :

Dans un premier lieu de l'étude expérimentale, on présente une série d'essais expérimentaux effectués sur la caractérisation des matériaux utilisés pour la fabrication de notre béton. Vu les résultats obtenus, ces matériaux sont satisfaisants aux conditions requises pour être utilisés pour la recherche d'un béton de propriétés rhéologiques et mécaniques acceptables.

Au deuxième lieu de l'étude expérimentale. Nous étudions tout d'abord, la conception des formulations du béton de fibres. Pour cela une méthode d'optimisation de la composition des bétons de fibres est utilisée, il s'agit d'optimiser le squelette granulaire sans fibres comme une formulation de base, ensuite en fonction des fibres incorporées avec un certain pourcentage de super plastifiant, pour une maniabilité acceptable qui peut conduire à une mise en œuvre facile et correcte.

A partir de cette formulation, on présente une série d'essais expérimentaux effectués sur le béton à l'état frais et à l'état durci (résistances mécaniques, retrait, durabilité à l'eau, vitesse du son ultrasonique, comportement de flexion sur des poutres armées) ainsi que l'exposition de leurs résultats et leurs interprétations.

Après cette étude expérimentale nous pouvons formuler les conclusions suivantes :

- ✓ L'optimisation et l'étude de maniabilité du béton frais renforcé de fibres, a montré que celle-ci diminue lorsque le pourcentage en fibres augmente. Pour un pourcentage de fibres maximal de 1%, le meilleur est obtenu lorsqu'on rajoute 0,3% du poids de ciment de super plastifiant. Des compositions de béton adéquates sont déterminées et ce en fonction du pourcentage en fibres incorporées.
- ✓ Concernant l'ouvrabilité du béton, les paramètres principaux sont la forme géométrique (l'élancement), ainsi que le dosage en fibres. De façon générale, on peut dire que les paramètres qui augmentent la performance, réduisent en même temps l'ouvrabilité.
- ✓ Les résistances à la compression et flexion de béton de fibres métalliques. Sont nettement supérieures à celles d'un béton sans fibres (notamment en flexion). Cela traduit par l'ajout de fibres métalliques dans la matrice, améliore de façon importante la ductilité du matériau, et améliore aussi le seuil de fissuration.
- ✓ L'élancement et la quantité de fibres semblent être les facteurs les plus importants qui dominant le retrait, on peut dire que les fibres ont un effet bénéfique sur la réduction du taux de retrait.
- ✓ D'une manière générale, on remarque une légère diminution dans la résistance à la compression suite à l'essai mouillage-séchage, et ceci pour toutes les compositions envisagées. L'effet de cet essai est d'autant plus remarquable que le béton préparé sans fibres.
- ✓ L'essai de durabilité gel-dégel influe négativement sur la résistance à la compression, les bétons préparés avec fibres métalliques semblent donner pratiquement les mauvaises résistances au gel. On constate cette résistance diminuée en fonction du dosage et de longueur de fibres métalliques.
- ✓ La présence des fibres métalliques modifie la porosité de la matrice. L'éprouvette avec fibres est plus poreuse que celle sans fibres.

- ✓ On remarque aussi que l'absorption d'eau augmente nettement avec l'augmentation du dosage et de longueur de fibres métalliques. Ainsi l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.
- ✓ La vitesse de propagation du son dans le béton est diminuée avec l'augmentation du dosage et de longueur de fibres métalliques. Cela est peut être lié à la présence des fibres qui obligent les ondes à parcourir un chemin plus long.
- ✓ Les résistances mécaniques à la compression déterminées par la presse sont supérieures à celles déterminées par l'ultrason à partir de 28 jours pour tous les bétons. Ce qui reflète que les essais destructifs est plus adopté au cas des bétons de fibres métalliques durcis.

Sur la base de ces résultats obtenus, nous avons utilisés ce type béton dans la fabrication des poutres de dimension (110 x 15 x 10 cm³) pour étudier le comportement mécanique de flexion. L'objectif de cette étude concerné à étudier l'effet de la fibre sur :

- La flèche à mi travées des poutres;
- L'évolution et ouverture de fissure des poutres;
- La possibilité de remplacement complète des cadres transversales par des fibres métalliques.

Les conclusions de cette partie de l'étude ont été les suivantes :

- ✓ Les flèches des poutres de contrôles (PBO) sont plus importantes que celles obtenues avec les poutres renforcées en fibres (avec et sans armatures transversales). En comparant les flèches obtenues avec les fibres courtes et celles obtenues avec les fibres longues, on remarque que les premières sont sensiblement supérieures aux secondes.
- ✓ Les poutres PBFC2, PBFL2 avec armatures transversales ont une rigidité et une résistance au cisaillement beaucoup plus grande que celles des poutres non renforcées. De plus, la présence de renforcement par des fibres métalliques a retardé l'ouverture des fissures critiques. Donc on peut utiliser les fibres métalliques comme armature complémentaire de poutres en béton armé soumises à la sollicitation de flexion importante.
- ✓ Pour les poutres préparées avec armatures transversales. L'ouverture de la fissure est largement réduite quand on passe d'un élanement de fibres à un autre. La vitesse de propagation des fissures est nettement inférieure à celle obtenue dans le béton témoin. Donc les fibres ont améliorés le comportement post fissuration du béton.

- ✓ Dans le cas des poutres fabriquées sans armatures transversales, le dosage et le type de fibres utilisées n'ont pas permis de réduire l'ouverture de fissure par rapport aux poutres témoins et n'ont pu entraîner de modification du mode de ruine. On constate que la substitution totale des armatures transversales par ce type de fibres et pour la quantité utilisée n'est pas efficace. C'est-à-dire les fibres ne peuvent pas remplacer entièrement les armatures transversales dans notre cas (poutres) qui sont soumises à un effort tranchant très important.

L'ensemble de ce travail expérimental sur la possibilité de l'exploitation des matériaux locaux (sable de dune et les déchets récupérés sur les chantiers "chutes de fils d'attaches"). Nous avons constaté qu'il y a un gain appréciable dans l'utilisation de ce type de matériaux pour la fabrication d'un béton de structure. Malgré la forme de fibres utilisées lisses et droites (mauvaise adhérence, facilité d'arrachement), cela ne pas influé sur les promoteurs résultats obtenus, donc on peut dire que les bétons à base de sable dunaire pourront remplacer les bétons classiques dans certaines applications, ce béton semble avoir un grand avenir dans certains domaines, les avantages techniques et économiques des bétons en laissent prévoir un développement important pour le futur.

Recommandations

Sur la base des travaux réalisés dans la présente étude, de futurs travaux sont recommandés dans les points suivants :

- ❖ Etude de la durabilité d'un béton à base de sable de dune renforcé par des fibres métalliques "fil d'attache" en milieu agressif (étude de la corrosion).
- ❖ Contribution à la substitution des armatures transversales d'une poutre fabriquée en béton à base de sable de dune par l'addition des plusieurs pourcentages en fibres métalliques surtout au niveau des zones où l'effort tranchant est maximal.
- ❖ Confirmation de la possibilité de fabrication des poutres en béton à base de sable de dune sollicitées par la flexion, en réduisant le pourcentage d'acier longitudinal avec l'augmentation du dosage en fibres métalliques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice_espaces/GC/matériaux/mtx3/Cours_Matériaux/3.3.PDF (consulté le 20/11/2010).
- [2] **BERND Weiler, CHRISTIAN Grosse.**, *Comportement à l'arrachement de fibres d'un béton renforcé de fibres d'acier.*
- [3] **EL HILALI Abdellah.**, (2009), *Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (bap): influence des fines calcaires et des fibres végétales*, thèse de doctorat, Université Cergy Pontoise, France.
- [4] **MASMOUDI Mounira.**, (2008), *Amélioration des caractéristiques mécaniques du béton et du mortier par renforcement en fibres d'acier*, Mémoire de magister, université de Biskra, Algérie.
- [5] **BENTALHA M.**, (2007), *Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, Caractérisation - comportement monotone - microstructure*, Thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie.
- [6] **DREUX G, FESTA J.**, (2002), *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Huitième édition, Edition Eyrolles.
- [7] <http://www.lafarge-france.fr/LB-Fibres-Metalliques.PDF> (consulté le 12/04/2011).
- [8] **FRITH Youcef.**, (2009), *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- [9] **EDINGTON J, HANNANT D J WILLIAM R I T.**, (1986), *Steel fibers reinforced concrete*, G. B. Building.
- [10] **BOURAS R, KACI S, et ROTH J C.**, (2006), *Approche théorique et expérimentale du comportement rhéologique des bétons de fibres métalliques à l'état frais*, Vol. 9, pp 22-27.
- [11] **GUILLAUME Camps.**, (2008), *Etude des interactions chemo - mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [12] **CASANOVA Pascal.**, (1995), *Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure*, Thèse de doctorat, Laboratoire National des Ponts et Chaussées, France.
- [13] **ABDOU Kamel.**, (2007), *Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire*, Thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie.
- [14] **TAYLOR M, LYDON F D, BARR B I G.**, (1997), *Toughness measurements on steel fibre-reinforced high strength concrete. Cement and Concrete Composites*, vol 19, pp329-340.

- [15] **HOLISTER G S, THOMAS C., (1966)**, *Fibre Reinforced Materials*, New York, Elsevier, 154 p.
- [16] **SOROUSHIAN P, BAYASI Z., (1987)**, *Prediction of the Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete: a Critique of the Composite Material Concept*, *Fiber Reinforced Concrete, Properties and Applications*, American Concrete Institute, SP-105, pp71-84.
- [17] **SHAH S P, RANGAN B V., (1971)**, *Fibre reinforced concrete properties*, journal American Concrete Institute.U.S.A, Proceeding.Vol . 68, N° 2, pp126-135.
- [18] **MEHTA P K., (1986)**, *Concrete : structure, properties, and materials*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 450p.
- [19] **PORTER H F., (1910)**, *Preparation of concrete from selection of materials to final Disposition*, Journal. American. Concrete. Institute., Vol. 6, 296p.
- [20] **WEAKLEY B D., (1912)**, *Bonding means for reinforced concrete structures*. US Patent N°13. 1, 046,913.
- [21] **FICKLEY W., (1914)**, *Improvements in reinforcing structures and wearing surfaces of hydraulic, bituminous like cement, concrete, asphalt*, British Patent N°11754.
- [22] **ANTOINE, E.N., (1985)**, *Fibre reinforced for concrete, Concrete International design and construction*, vol 7, N° 3, March 1985, pp.21-25.
- [23] **BATTELLE DEVELOPMENT CORPORATION., (1963)**, *Concrete and steel material*, British Patent N°1068163.
- [24] **LANKARD D R, SHEETS H D., (1971)**, *Use of steel wire fibres in refractory Castables*, Am. Cer. Soc., Vol. 63, No.7.
- [25] **ROMUALDI J P, BATSON G B., (1963)**, *Mechanics of crack arrest in concrete*, Proceeding of American. Society of Civil Engineers, Vol.89, pp147- 168.
- [26] **ROSSI P, ACKER P, MALIER Y., (1987)**, *Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure*, Materials and Structures, vol. 20, pp436-439.
- [27] **MEDDAH Med Seddik ., (2000)**, *Étude d'un béton renforcé de fibres de déchets industriels*, Mémoire de magister, université de Laghouat, Algérie.
- [28] **CHANVILLARD G, DESTREE X., (1996)**, *quelques aspects de la durabilité des bétons renforcés de fibres métalliques à enclage total*, 2e colloque international francophone sur les BRFM, Toulouse, pp85-97.
- [29] **ROSSI P., (1998)**, *Les bétons de fibres métalliques*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France.
- [30] **BEN YAHIA Abdeslam., (2001)**, *l'Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique du béton*, Mémoire de magister, université de M'sila, Algérie.
- [31] **DARDARE J., Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibres de polypropylène**, RILEM Neville (A), 120, communication 5.2, pp227-235.

-
-
- [32] **ZIAD Bayasi, JACK Zeng., (1993)**, *Properties of polypropylene fiber reinforced concrete*, ACI Materials Journal, Volume 90, N°6, pp605-612.
- [33] **LÖFGREN I., (2005)**, *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.
- [34] **JONHSTON C D, COLEMAN R N., (1974)**, *Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension*, International Symposium: Fiber reinforced concrete, AC, Publication SP- 44, Detroit, pp177-193.
- [35] **ABBANI Saïd., (2003)**, *Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier*, Mémoire de magister, université de Ouargla, Algérie.
- [36] **ACI 544., (1973)**, *State of the-art: report on fiber reinforced concrete*, journal American Concrete Institute. U.S.A, Proc. Vol. 70, n° 11 pp. 729-744.
- [37] **BENTALHA M, HOUARI H., (2007)**, *Étude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant*, Sciences technologie B – N°25, pp51-58.
- [38] **DEHOUSSE N M., Méthodes d’essais et caractéristiques mécaniques des bétons armés de Fibres métalliques**, RILEM, Neville, 120 Communication 4.1, pp119-136.
- [39] **BATSON G et al., (1972)**, *Steel fibers as shear reinforcement in beams*, journal American Concrete Institute, U.S.A, Octobre, Proc. Vol. 69, N°10, pp 640-644.
- [40] **BAKHTI S, SAAD H, TAAZOUNT M, MOHAMMED A H., (2010)**, *Étude de la ductilité des nœuds de Structures poteaux -poutres en béton de fibre métalliques*, Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, université de Chlef, Algérie, 15p.
- [41] **ABDOU Kamel, HOUARI Hacène., (2009)**, *Influence des fibres d’acier sur les variations dimensionnelles et pondérales des matrices cimentaires*, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, Université de Constantine, Algérie, p9.
- [42] **MANGAT P S, AZARI M., (1988)**, *Shrinkage of steel fiber reinforced cement composite*, Matériaux et construction, N° 21.
- [43] **CHERAIT Y, NAFA Z., (2007)**, *Éléments de matériaux de construction et essais*, Collection : le livre de génie civil, Direction de la publication universitaire de Guelma.
- [44] **SWAMY R N, STAVRIDES H., (1975)**, *Some properties of high workability steel fibers concrete*, in fiber reinforced cement and concrete, rilem sym, Lancaster, construction press, pp 197-208.
- [45] **BEDRANI Mohamed., (2005)**, *Caractérisation d’un béton renforcé de fibres de polypropylène*, Mémoire de magister, université de Laghouat, Algérie.

-
-
- [46] **EZZIANE M, JAUBERTHIE R, KADRI T, et BOUHALOUFA A., (2010)**, *comportement mécaniques des mortiers fibres a des températures enlevées*, Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, université de Chlef, Algérie, 7p.
- [47] **http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice_espaces/GC/matériaux/mtx3/Cours_Matériaux/5.5.PDF** (consulté le 09/12/2010).
- [48] **ROSSI P., (2002)**, *Le développement industriel des bétons de fibres métalliques*, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France.
- [49] **SERNA ROS P., (1984)**, *Étude de Contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement*, Thèse Doct. Ing : Ecole national des Ponts et Chaussées, Paris, 77p.
- [50] **ROSSI P, HARROUCHE N, BELLOC A., (1989)**, *Méthode de composition des bétons de fibres métalliques*, Annales ITBTP, n°475, Série : Béton 266.
- [51] **BOUCEDRA Aissa, BELAHBIB boudali., (1999)**, *Formulation et caractérisation des bétons renforcés des fibres végétales de palmier*, Projet de fin d'étude d'ingénieur, Université de Laghouat, Algérie.
- [52] **ODELBERG G., (1985)**, *Producing and Promoting of Swedish steel fibers to the market*, In: Steel Fiber Concrete Seminar Stockholm, June 1985, Edited: S.P.Shah et al, Amsterdam, Elsevier, pp 185-197.
- [53] **EDINGTON J., (1973)**, *Steel fibre reinforced concrete*, Thesis for the degree of PhD, University of Surrey, England, 352 p.
- [54] **BALAGURY P, RAMAKRISHNAN V., (1987)**, *Comparison of Slump Cone and V-B tests as measures of workability for fiber-reinforced and plain concrete*, cement Concrete Aggregate revue, Vol. 9, N°1, pp 3-11.
- [55] **BARON J, LESAGE R., (1965)**, *Pour une étude pratique de la maniabilité: le maniabilimètre Lesage du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, Bulletin de Liaison des LPC, n°13.
- [56] **Hu C., (1995)**, *Etude du comportement rhéologique des bétons frais*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [57] **EDINGTON J, HANNANT D J., (1972)**, *Steel fiber reinforced concrete; the effect on fibre orientation of compaction by vibration*, Matériaux de Construction. RILEM, France, Vol. 5, N° 25, pp41-44.
- [58] **MANGAT P S, SWAMY R N., (1974)**, *Comapactibility of steel fiber reinforced concrete*, Concrete Magazine, May, pp34-36.
- [59] **LIM T Y, PARAMSIVAM P, LEE S I., (1987)**, *Bending behavior of steel fiber concrete beams*, A. C. I, Structural journal.
- [60] **TECHNIQUE DE L'INGENIEUR 1991.**

- [61] **SABLOCRETE.**, (1994), *Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation*, Projet National de Recherche et Développement, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [62] **TAFRAOUI Ahmed.**, (2009), *Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie)*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- [63] **MIRONKOV B A, STERYNE V S.**, (1991), *béton de sable dans la construction civile de LENINGARD*, séminaire Franco-Soviétique sur le béton de sable ; Bordeaux, pp104-110.
- [64] **GUINEZ R, GLUAIS G, DELUDE P.**, (1984), *le béton de sable*, rapport diffusé par le ministère de l'urbanisme et du logement, laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux.
- [65] **BENAISSA A.**, (1992), *Déformations différées d'un béton de sable*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France.
- [66] **BENMALEK M L.**, (1997), *le béton de sable de dune : un matériau de construction performant pour le monde Arabe*, First Arab Mechanics Congress, Damaascus, Syria.
- [67] **AZZOUZ Hocine.**, (2009), *Étude des bétons à base des sables de dune*, Mémoire de magister, université de Biskra, Algérie.
- [68] **BENTATA Aissa.**, (2004), *Étude expérimentale d'un béton avec le sable de dune*, Mémoire de magister, université de Ouargla, Algérie.
- [69] **BOUHNİK Brahim.**, (2007), *Contribution à la valorisation du sable de dune dans la formulation du béton destiné aux ouvrages hydrauliques en milieux sahariens*, Mémoire de magister, université de Ouargla, Algérie.
- [70] **ماني محمد.** (2010), *المساهمة في تحسين خصائص خرسانة رمل الكثبان بواسطة التصحيح الحبيبي والتعزيز بالألياف المعدنية. مذكرة ماجستير. جامعة ورقلة, الجزائر.*
- [71] **GLUAIS G, BRU J P.**, (1993), *Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable*, Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, N° 183- NIT 3697, Paris, pp91-95.
- [72] **Norme Française P18-555.**, (1990), *Granulats – Mesures des Masses Volumiques, Coefficient d'Absorption et Teneur en Eau des Sables*, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [73] **Norme Française P18-591.**, (1990), *Granulats – Détermination de la propreté superficielle*, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [74] **Norme Française P18-573.**, (1990), *Granulats, essai Los Angeles*, Éditions AFNOR, Paris, 1990.
- [75] **Norme Française P18-598.**, (1991), *Granulats, Analyse granulométrique par tamisage*, Éditions AFNOR, Paris, 1991.
- [76] **BEDRINA M.**, (2007), *Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base de déchets de bois*, Thèse de doctorat, ENP, Algérie.

-
-
- [77] **Norme Française P18-598.**, (1991), *Granulats, essai d'équivalent de sable*, Éditions AFNOR, Paris, 1991.
- [78] **Fiche de qualité.** , *Ciment CPJ-CEMII / B 42.5 N*, conformément à la norme NA442, édition 2000.
- [79] **Norme Européenne NF EN 196-3.**, (1990), *Méthodes d'essais des ciments –Partie 3: Prise de Ciment*, Paris 1990.
- [80] **Norme Européenne NF EN 196-6.**, (1990), *Méthodes d'essais des ciments – Partie 6 : Détermination de la finesse*, Paris 1990.
- [81] **Norme Européenne NF EN 196-6.**, (1995), *Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques*, Paris, 1995.
- [82] **Fiche de qualité.** ; (2010), *Adjuvant Superplastifiant MEDAFLOW30*, conformément à la norme EN 934-2, et NA 774 édition juillet 2010.
- [83] **LAICHAOUI Ahmed** (2006), *Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites*, mémoire de magister, ENP, Algérie.
- [84] **Norme Française P18-303.**, (1999), *Eau de gâchage pour béton*, Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [85] **GORISSE. F.**, (1990), *Essais et contrôle des bétons*, Édition EYROLLES, vol.200, Paris, 1978.
- [86] **Norme Française.**, (1981), *Béton-Essai d'étude, de convenance et de contrôle-confection des éprouvettes*, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [87] **Norme Française, P18-451.**, (1981), *Béton-Essai d'Affaissement*, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [89] **Norme Européenne NF EN 12350-6.**, (1999), *Essai pour béton frais –Partie 6: Masse volumique*, Éditions AFNOR, Paris 1999.
- [90] **Norme Européenne NF EN 12390-7.**, (2001), *Essai pour béton durci –Partie 7: Masse volumique du béton*, Éditions AFNOR, Paris 2001.
- [91] **Norme Française, P18-406.**, (1981), *Béton-Essai de compression*, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [92] **Norme Française, P18-407.**, (1981), *Béton-Essai de flexion*, Éditions AFNOR, Paris 1981.
- [93] **ARNAUD Pertué.**, (2008), *Etude expérimentale du retrait endogène, du fluage propre et de la fissuration des matrices cimentaires aux jeunes et très jeune âges*, Thèse de doctorat, Université de Nantes.

- [94] **Norme Française, P18-427.**, (1996), *Béton- Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci*, Éditions AFNOR, Paris 1996.
- [95] **ASTM D 559 - 57.**, *Wetting-and-Drying Tests of Compacted Soil - Cement Mixtures*.
- [96] **Norme Française, P 18 424, (1994)**, *Bétons - Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'eau et dégel dans l'eau*, Éditions AFNOR, Paris 1994.
- [97] **Norme Française, P 18 425, (1994)**, *Bétons - Essai de gel sur béton durci – Gel dans l'air et dégel dans l'eau*, Éditions AFNOR, Paris 1994.
- [98] **Norme Européenne NF EN 480-5, (1996)**, *Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis – Méthodes d'Essai –Partie 5 : Détermination de l'Absorption Capillaire*, Éditions AFNOR, Paris 1996.
- [99] **Norme Française, P 18 418. (1989)**, *béton-Auscultation sonique*, Éditions AFNOR, Paris 1989.
- [100] **TAHENNI. T, CHEMROUK. M, (2009)**, *Etude des flèches et des ouvertures de Fissures des poutres en béton arme contenant Des fibres d'acier*, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries; ENSET, Oran Algeria.
- [101] **<http://www.google-france.fr/> Initiation au béton armé. Détermination de ferrailage complet d'une poutre en flexion simple (à l'état limite ultime).PDF** (consulté le 15/04/2012)
- [102] **HOCINE Oucief., (1998)**, *Formulation et comportement mécanique d'un béton a base de fibres métalliques*, Thèse de magister, université de Annaba, Algérie.
- [103] **BELFERAAG Allaoua, (2006)**, *Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes*, Mémoire de magister, université de Ouargla, Algérie.
- [104] **HADJOUJJA. M, H.A. MESBAH, M.M. KHENFER. (2011)**, *Déformations de retrait d'un béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques*, La 29 Rencontres Universitaires de Génie Civil. AUGC. Tlemcen, 29 au 31 Mai.
- [105] **RICHANE Saci (2004)**, *Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton*, Mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf M'sila, Algérie.

ANNEXES

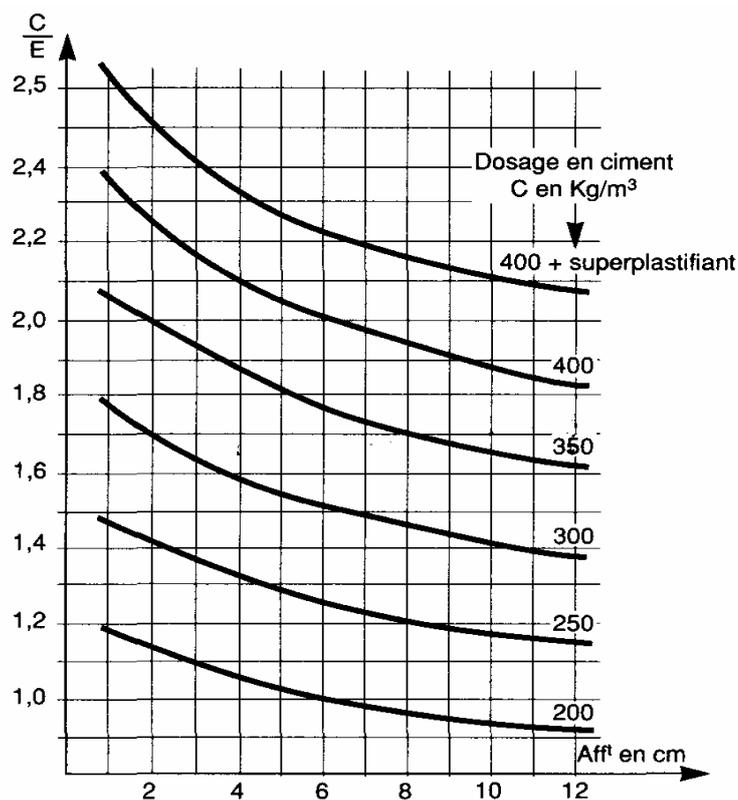
Annexe 1 : Composition chimique de l'eau.

Nature du point d'eau		Robinet		
Ca ⁺² en mg/l		193	Balance	9,63
Mg ⁺² en mg/l		39	Cations	1,17
Na ⁺ en mg/l		96	m.é/l	4,17
K ⁺ en mg/l		5,4	15,11	0,14
Cl ⁻ en mg/l		128	Balance	3,61
SO ₄ ⁻² en mg/l		430	Anions	8,4
CO ₃ ⁻ en mg/l		-		-
HCO ₃ ⁻ en mg/l		161	m.é/l	2,64
NO ₃ ⁻ en mg/l		11,07	14,8	0,18
Conductivité en 1/10 mm hos à 25		15,2	MINERALISATION 930 mg /l	
Résidu sec à 110°C		116,5mg/l	Somme des ions 1011,7 mg/l	
T.H	T.A.C	T.A	S.A.F	I.S
54	13,2	0	59,55	26,7
Nitrites NO ₂		Traces		
M.O milieu Acide en O ₂		7,6		
D.C.O		0,8		
Fer en Fe ₂ O ₃		0,056		
PH		7,48		
Cations	Ca ⁺² = 63,7%	Mg ⁺² = 8%	Na ⁺ + K ⁺ = 28,5%	
Anions	HCO ₃ ⁻ = 18%	SO ₄ ⁻² = 56,6%	Cl ⁻ + NO ₃ ⁻ = 25,5%	
Potabilité chimique		Bonne passable		

Annexe 2 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [6].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16$ mm)	Moyens $20 \leq D \leq 40$ mm)	Gros ($D \geq 50$ mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
passable	0,35	0,40	0,45

Annexe 3 : Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E [6].



Annexe 4 : Valeur du coefficient K [6].

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Format des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage ciment	400+ F	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Annexe 5 : Valeurs du coefficient de compacité γ [6].

Consistance	Serrage	Coefficient γ en fonction du diamètre D des granulats						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Annexe 6 : Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation des implosions [43].

Qualité du béton	Vitesse de propagation (m/sec)
Excellente	Supérieure à 4575
Bonne	3660 à 4575
Douteuse	3050 à 3660
Mauvaise	2135 à 3600
Très mauvaise	Inférieure à 2135

Annexe 7 : Essai de traction sur une fibre métallique.



Annexe 8 : Malaxeur à Béton.



Annexe 9 : Moules utilisées.



Moule prismatique 10x15x110 cm³.



Moule prismatique 7x7x28 cm³.



Moule cubique 10x10x10 cm³.

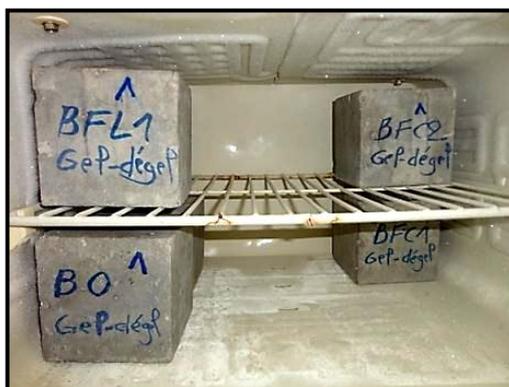
Annexe 10 : Eprouvettes utilisées.



Conservation à l'air libre ENVII.

Conservation sous l'eau ENVI.

Annexe 11 : Matériels pour l'essai de durabilité à l'eau.



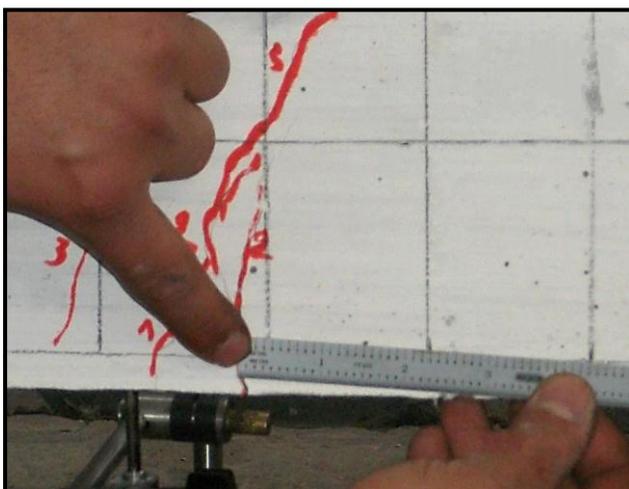
Conservation des éprouvettes dans les conditions de gel.

Étuve utilisé.

Annexe 12 : Matériels pour l'essai de flexion sur des poutres.



Dispositif de l'essai de flexion 4 point.



Mesure l'o uverture de fissure.



Control la propagation des fissures.

FICHE TECHNIQUE	
MATINE Ciment pour béton exigeant CEM III/A 42.5 R NA 442	<p>MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.</p> <p>Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.</p> <p>MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .</p> <p>Domaine d'utilisation :</p> <p>MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.</p> <p>Les principales applications de ce ciment sont :</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :➤ Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :➤ Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;➤ Secteur industriel.

Ciment Blanc Algérien (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél. : +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Usine Oggaz (CiBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



Réf : DC/FT MT.C v02

FICHE TECHNIQUE		
MATINE Ciment pour béton exigeant CEM II/A 42.5 R NA 442	Analyses et caractérisation	
	Analyses chimiques	
	Perte au feu (%), (NA 5042):	8.00 – 10.00
	Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 1,5
	Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2.10 – 2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1,00 – 1,30
	Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,03
	Composition hypothétique du clinker (Bogue)	
	Silicates tricalciques C ₃ S (%) :	55.00 – 62.00
	Silicates bicalciques C ₂ S (%) :	13.00 – 22.00
	Aluminates tricalciques C ₃ A (%) :	6,50 – 8,20
	Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%) :	10,00 – 13,00
	Propriétés physiques	
	Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
	Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4 300 – 4 800
	Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
	Expansion en mm	0,5 - 1,5
	Temps de prise à 20°C (NA 230)	
	Début de prise (min)	160 - 209
	Fin de prise (min)	205 - 270
Résistance à la compression (NA 234)		
02 jours (Mpa)	18,00 – 22,00	
28 jours (Mpa)	≥ 42.5	

Réf : DC/FT MT.C v02

Ciment Blanc Algérien (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél. : +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Usine Oggaz (CiBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

