

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية و الري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Génie civil

Spécialité (Option) : Génie civil

Intitulé

**Contribution à l'amélioration des propriétés
mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de
dunes**

Présentée par :

BELFERRAG Allaoua

Soutenue publiquement le 23/05/2016

Devant le jury composé de :

Dr. GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Président	Université Mohamed Khider Biskra
Dr. KRIKER Abdelouahed	Professeur	Rapporteur	Université Kasdi Merbah Ouargla
Dr. KHENFER Mohamed Mouldi	Professeur	Examineur	Université Amar Telidji Laghouat
Dr. BOUAZIZ Ahmed	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université Mohamed Khider Biskra

"Lorsque le dernier arbre aura été abattu, le dernier fleuve pollué, le dernier poisson capturé, vous vous rendrez compte que l'argent ne se mange pas."

Chef Seattle, 1854

"Le monde contient bien assez pour les besoins de chacun, mais pas assez pour la cupidité de tous."

Gandhi

Remerciements

J'exprime en premier lieu mes remerciements à mon directeur de thèse Monsieur Kriker Abdelouahed, pour son indéfectible soutien, ses conseils et facilitations durant la préparation de ce travail. Qu'il trouve ici toutes mes reconnaissances.

Je tiens à remercier Monsieur, Guettala Abdelhamid, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Mes remerciements vont également à Monsieur Khenfer Mohamed Mouldi et Monsieur Bouaziz Ahmed qui m'ont fait l'honneur de prendre part au jury de cette thèse, pour leurs contributions accordées à l'évaluation et à l'enrichissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Mes plus vifs remerciements vont à l'ensemble du personnel du laboratoire LTPS-Ouargla pour leurs collaborations, et plus particulièrement Monsieur Hafsi Abdellatif pour son accueil chaleureux à chaque fois que j'ai sollicité son aide.

Mes reconnaissances aussi envers tous ceux qui m'ont aidé et encouragé dans l'élaboration de cette thèse plus particulièrement Youcef Leila (Université de Biskra), Abboudi Said (Utbm France) et Salima Tié-bi (Utbm France).

Un merci tout particulier à ma femme qui m'a apportée beaucoup de réconfort et d'aide tant sur le plan scientifique que moral.

Je souhaite remercier aussi tous mes collègues du département de génie civil et hydraulique à l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

Evidemment, j'aimerais remercier tous mes amis en particulier Tamene Youcef et Boudjedaa Badereddine pour leurs encouragements et leurs soutiens tout au long de ce travail.

Enfin, je dois beaucoup à mes parents et à ma famille. Je pense à eux.

A mes parents

A toute ma famille

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes et l'ajout d'un nouveau type de fibres métalliques, résultant de déchets pneumatiques, sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

Cinq types de fibres ont été testés : Trois fibres pour l'étude de la résistance mécanique du béton de sable de dunes possédant des longueurs de 30, 40 et 60 mm, des diamètres respectifs de 0,9 ; 0,28 et 0,9 mm et des élancements de 33,33 ; 142,86 et 66,67 avec des dosages de 1.0 % et 1.5 %, et deux fibres pour l'étude des caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton confectionné avec du sable de dunes et du sable alluvionnaire ayant des longueurs de 20 et 30 mm, un diamètre de 0,28 mm et des élancements respectifs de 71,43 et 107,14 avec des dosages de 0.5 % et 1.0 %.

Les résultats obtenus montrent une amélioration de la résistance mécanique du béton de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques par rapport au béton sans fibres. Cette amélioration est gouvernée par la taille, les proportions, l'orientation des fibres et la liaison entre les fibres et le béton.

Néanmoins, la granulométrie du sable de dunes (SD) présente un handicap avec ses grains fins et homométriques influant plus particulièrement sur les caractéristiques rhéologiques. De ce fait, nous avons procédé à une correction de sa granulométrie par un sable alluvionnaire (SA) en utilisant les proportions de 50% SD + 50% SA et 40% SD + 60% SA. Les sables obtenus par cette correction présentent une amélioration à la fois du module de finesse par rapport au sable de dunes et de l'équivalent de sable par rapport au sable alluvionnaire.

Une diminution du retrait et une amélioration de la compression et de la flexion est observée avec la correction granulométrique du sable de dunes et l'ajout de fibres. Les meilleurs résultats ont été obtenus par les mélanges préparés à base de 40% SD et 60% SA et des fibres ayant l'élancement le plus important avec un dosage en fibres de 1.0%. La perte en poids est plus significative pour les bétons de sable fibrés par rapport aux bétons de sable sans fibres.

Mots clés : Sable de dunes, Sable alluvionnaire, Déchets pneumatiques, Correction granulométrique, Béton de sable, Valorisation, Fibres métalliques, Caractéristiques mécaniques, Retrait.

Abstract

In this work, the effect of granulometric correction of dune sand and the addition of new metallic fibers resulting from pneumatic waste on the mechanical and rheological properties of concrete was studied.

Five types of fibers were tested: Three fibers for the study of mechanical resistance of dune sand concrete, with lengths of respectively 30, 40 and 60 mm, diameters of 0.9, 0.28 and 0.9 mm and aspect ratios of 33.33, 142.86 and 66.67, at a fiber volume of 0.5%, 1 % and 1.5%, and two for the study of mechanical and rheological characteristics of concrete made with a mixture of dune sand and river sand with lengths of 20 and 30 mm, a diameter of 0.28 mm and, aspect ratios of 71.43 and 107.14 at a fiber volume of 0.5% and 1%.

The results show an improvement in the mechanical strength of dune sand concrete reinforced by steel fibers compared to concrete without fibers. This improvement is governed by size, proportions, orientation of the fibers and the fibers-concrete bond.

Nevertheless, the granulometry of dune sand (DS) is very tight characterized by homometric grains influencing in particular the rheological properties. A correction of the granulometry of dune sand (DS) by a river sand (RS) was undertaken with the proportions of 50% DS+50 % RS and 40 % DS+60 % RS.

For the sands obtained from mixing DS and RS, an improvement of the sand equivalent was observed compared to river sand and of finesses modulus of dune sand.

The granulometric correction of the dune sand and the addition of fibers reduced the drying shrinkage and improve the compressive and flexural strengths. The best results were obtained for the mixtures prepared with: 40% DS and 60% RS, fibers having the highest aspect ratio and a fiber volume fraction of 1%. Weight loss was more important for the sand fiber reinforced concretes compared to plain sand concretes.

Key words: Dune sand, River sand, Pneumatic waste, Granulometric correction, Sand concrete, Valorization, Metal fiber, Mechanical proprieties, Shrinkage.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة تأثير تصحيح التوزيع الحبيبي لرمل الكثبان وإضافة نوع جديد من الألياف المعدنية المستخلصة من العجلات المستعملة، على الخواص الميكانيكية والريولوجية للخرسانة. قمنا باختبار خمس أنواع من الألياف: ثلاثة ألياف لدراسة المقاومة الميكانيكية لخرسانة رمل الكثبان بأطوال 30، 40 و 60 مم وأقطار 0.9 ، 0.28 و 0.9 مم و بنسب الطول/القطر المساوية ل: 33.33، 142.86 و 66.67 مع نسبة ألياف: 0.5%، 1% و 1.5%، و نوعين اثنين لدراسة الخصائص الميكانيكية و ظاهرة الانكماش لخرسانة متكونة من خليط لرمل الكثبان مع رمل الواد بأطوال 20 و 30 مم، و قطر 0.28 مم و بنسب الطول/القطر 71.43 و 107.14 و نسبة ألياف تقدر ب 0.5% و 1%.

و أظهرت النتائج تحسنا ملموسا في المقاومة الميكانيكية لخرسانة رمل الكثبان المعززة بالألياف الفولاذية بالنسبة للتي لا تحتوي على ألياف. ويخضع هذا التحسن إلى الحجم، النسبة، اتجاه الألياف و التماسك بين الألياف والخرسانة.

أظهرت النتائج أيضا أن التوزيع الحبيبي لرمل الكثبان (SD) ناعم جدا، مما يؤثر خاصة على الخصائص الريولوجية، وقد دفعنا ذلك إلى القيام بتصحيح حبيبي لرمل الكثبان باستعمال رمل الواد (SA) بنسب :

لرمل الواد و معامل النعومة بالنسبة إلى رمل الكثبان. SA %50 + SD %50 و SA %60 + SD %40. لاحظنا تحسنا في المكافئ الرملي بالنسبة

كما أظهرت النتائج انخفاضا للانكماش وتحسنا للخصائص الميكانيكية إثر التصحيح الحبيبي لرمل الكثبان، و إضافة الألياف. و قد حصلنا على أحسن النتائج بالنسبة للخليط SD %40 و SA %60 و بألياف ذات أكبر نسبة طول/قطر و بنسبة تقدر ب 1% . فقدان الوزن أهم بالنسبة إلى خرسانة الرمل المدعمة بالألياف بالمقارنة مع تلك غير المدعمة بالألياف.

الكلمات الدالة: رمل الكثبان، رمل الواد، عجلات مستعملة، تصحيح التوزيع الحبيبي، خرسانة الرمل، تثمين، ألياف معدنية، خصائص ميكانيكية، انكماش.

**LISTES DES ABREVIATIONS,
DES FIGURES, DES
TABLEAUX ET DES PHOTOS**

Liste des abréviations

SD	Sable de dunes
SA	Sable alluvionnaire
BSD	Béton de sable de dunes
0.5BSD_f	Béton de sable de dunes renforcé par des fibres à un dosage de 0,5 %
1.0BSD_f	Béton de sable de dunes renforcé par des fibres à un dosage de 1,0 %
1.5BSD_f	Béton de sable de dunes renforcé par des fibres à un dosage de 1,5 %
BSDA1	Béton formulé avec 50% sable de dunes+50% sable alluvionnaire
BSDA2	Béton formulé avec 60% sable de dunes+40% sable alluvionnaire
DRX	Diffraction à rayons X
D	Diamètre
e	Epaisseur
l	Longueur
l _f	Longueur de fibre
L	Largeur
R _t	Résistance à la traction
E/C	Eau/Ciment
ES	Equivalent de sable
M _f	Module de finesse
λ	Elancement
σ	Contrainte
ε	Déformation
α	Degré de dispersion de fibres
β	Facteur d'orientation des fibres
ρ	Densité des fibres
μ	Coefficient caractérisant l'interface fibres-matrice
ε _{bf}	Déformation de retrait du béton de fibres
ε _{bc}	Déformation de retrait du béton courant
E	Module de Young
F _R	Force de rupture
v _f	Volume en fibres
p	Porosité

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Géométrie des fibres métalliques (formes et section variables) (Haouari, 1993; Löfgren, 2005).	11
Figure I.2 : Les constituants d'un pneumatique (points68, 2014).	14
Figure I.3 : Quantités de déchets de pneumatiques (en millions de pneus) et filières de valorisation dans le monde (Ernst et Young, 2014).	17

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma montrant l'influence et les mécanismes de dispersion des particules par l'adjuvant (Vieira, 2015).	26
Figure II.2 : Béton avec et sans fibres à l'état fracturé (Müler et Haist, 2009).	29
Figure II.3 : Détermination du rapport S/G optimal (Rossi et al., 1989a).	31
Figure II.4 : Processus de fissuration dans le béton ordinaire (Rossi et al., 1987).	34
Figure II.5 : Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration au sein de la matrice (Yun et al., 2007).	35
Figure II.6 : Diagramme contrainte-déformation du béton renforcé avec différents pourcentages (à gauche) et rapports l/d de fibres (à droite) sous une charge de compression (ACI, 1988).	36
Figure II.7 : Résistance à la compression du béton à différents âges (Chern et Young 1989).	37
Figure II.8 : Contrainte-déformation du béton renforcé de différents pourcentages de fibres sous une charge de traction (ACI, 1988).	38
Figure II.9 : Influence du pourcentage de fibres sur la force en fonction de la largeur d'ouverture de fissure: cas des fibres de fer amorphes dans une orientation défavorable (Rossi, 1992).	40
Figure II.10 : Influence du pourcentage de fibres sur la force en fonction de la largeur d'ouverture de fissure: cas des fibres de fer amorphes dans une orientation favorable (Rossi, 1992).	41
Figure II. 11 : Effet du volume des fibres sur le fluage du béton dans les conditions sèches ou humides (âge de chargement (a) $t' = 7d$; (b) $t' = 28d$) (Chern et Young, 1989).	43

Chapitre III

Figure III.1: Localisation des gisements de sables utilisés (Image Google earth).	50
---	----

Figure III.2 : Schéma montrant les étapes et le procédé de formulation des bétons.	58
Figure III.4 : Table à secousses (Flow test) (Dreux et Festa, 1998).	61
Figure III.5 : Essai Vébé.	62
Figure III.6 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.	62
Figure III.7 : Dispositif pour l'essai de traction par flexion (3 points) (Dupain et al., 2000).	63
Figure III.8 : Dispositif de rupture en compression (Dupain et al., 2000).	64
Figure III.9 : Appareillage pour la mesure du retrait (Rétractomètre).	65

Chapitre IV

Figure IV.1 : Courbe granulométrique du sable de dunes.	68
Figure IV.2 : Force de rupture en traction pour fibre de $d = 0,9$ mm en fonction de la longueur.	70
Figure IV.3 : Courbe (contrainte-déformation) en traction pour fibre de $d = 0,9$ mm.	70
Figure IV.4 : Force de rupture en traction pour fibre de $d = 0,28$ mm en fonction de la longueur.	70
Figure IV.5 : Courbe (contrainte-déformation) en traction pour fibre de $d = 0,28$ mm.	70
Figure IV.6 : Temps Vébé des BSD_f en fonction du superplastifiant.	73
Figure IV.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1).	74
Figure IV.8 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_2).	75
Figure IV.9 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibres f_1 et f_2).	76
Figure IV.10 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_3).	77
Figure IV.11 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1 , f_2 et f_3).	78
Figure IV.12 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$).	80
Figure IV.13 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$).	81
Figure IV.14 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$).	82
Figure IV.15 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$).	82
Figure IV.16 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f_1).	84
Figure IV.17 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f_2).	84
Figure IV.18 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibres f_1 et f_2).	85
Figure IV.19 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f_3).	86
Figure IV.20 : Comportement du béton à la rupture.	86
Figure IV.21 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (effet du dosage en fibre f_1 , f_2 et f_3).	89
Figure IV. 22 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la flexion ($V_f=1.0\%$).	90
Figure IV. 23 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la flexion ($V_f=1.5\%$).	90
Figure IV. 24 : L'effet de la rigidité des fibres sur la résistance à la flexion ($V_f=1.0\%$).	91

Figure IV.25 : L'effet de la rigidité des fibres sur la résistance à la flexion ($V_f=1.5\%$).	92
Figure IV.27 : Courbe granulométrique des sables utilisés.	94
Figure IV.28 : Aspect général des grains du sable alluvionnaire (A) et du sable de dunes (B) (GX20). Sable alluvionnaire avec les impuretés (C) (GX15).	96
Figure IV.29 : Diffractogramme de rayons X du sable alluvionnaire.	97
Figure IV.30 : Diffractogramme de rayons X du sable de dunes.	97
Figure IV.31 : Temps Vété en fonction du rapport E/C des différents mélanges.	99
Figure IV. 32 : Résistance à la compression des bétons témoins en fonction d'âge.	100
Figure IV.33 : Résistance à la compression du BSD, BSDA1 et BSDA2 avec et sans fibres en fonction d'âge.	101
Figure IV.34 : L'effet du dosage et de l'élanement des fibres sur la résistance à la compression du BSD, BSDA1 et BSDA2.	103
Figure IV. 35 : Résistance à la flexion des bétons témoins en fonction d'âge.	104
Figure IV.36 : Résistance à la flexion du BSD, BSDA1 et BSDA2 avec et sans fibres en fonction d'âge.	105
Figure IV.37 : L'effet du dosage et de l'élanement des fibres sur la résistance à la flexion du BSD, BSDA1 et BSDA2.	107
Figure IV.38 : Retrait en fonction d'âge des bétons témoins.	109
Figure IV.39 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSD.	110
Figure IV.40 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSDA1.	111
Figure IV.41 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSDA2.	111
Figure IV.42 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec les fibres f_1 .	112
Figure IV.43 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec les fibres f_2 .	112
Figure IV.44 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec f_1 et f_2 à $V_f=0.5\%$.	114
Figure IV.45 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec f_1 et f_2 à $V_f=1\%$.	114
Figure IV.46 : Perte en poids en fonction d'âge pour les bétons témoins.	116
Figure IV.47 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSD.	116
Figure IV.48 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA1.	117
Figure IV.49 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA2.	117
Figure IV.50 : Retrait en fonction de perte en poids pour les bétons témoins.	118
Figure IV.51 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSD.	118
Figure IV.52 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSDA1.	119
Figure IV.53 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSDA2.	119

Liste des Tableaux

<i>Chapitre I</i>	
Tableau I.1 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres de verres (Beaudoin, 1982).	8
Tableau I.2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres synthétiques (ABQ, 2005).	9
Tableau I.3 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales (Do Thi, 2011).	10
Tableau I.4 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres métalliques	12
Tableau I.5 : Composition moyenne de pneu de véhicules utilitaires et de poids lourd en Europe (Shulman, 2011).	15
<i>Chapitre II</i>	
Tableau II.1 : Propriétés des adjuvants (CIM béton, 2005).	25
<i>Chapitre III</i>	
Tableau III.1 : Composition chimique du ciment en %.	51
Tableau III.2 : Analyse minéralogique du clinker (Fiche de qualité, 2000).	52
Tableau III.3 : Caractéristiques mécaniques du ciment (Fiche de qualité, 2000).	52
Tableau III.4 : Composition chimique de l'eau.	53
Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du superplastifiant utilisé.	55
Tableau III.7: Proportions des mélanges (1m ³).	59
Tableau III.8 : Proportions des mélanges (1m ³).	60
<i>Chapitre IV</i>	
Tableau IV.1 : Propriétés physiques de sable de dunes.	69
Tableau IV.2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres issues de pneus usés (f_1 , f_2 et f_3) et des fibres Dramix et Novocon.	71
Tableau IV.3 : Diamètre de l'étalement du béton de sable de dunes (1m ³).	71
Tableau IV.4 : Propriétés physiques des sables utilisés.	95

Liste des photos

Chapitre I

- Photo I.1 : Incendie de cinq millions de pneus au Koweït (Alsultan, 2012). 16
- Photo I.2 : 8.500 tonnes de pneus qui débordent, en lisière du petit village bucolique de Campsas (Aliapur, 2007). 16

Chapitre III

- Photo III.1: Fibres métalliques issues de pneus usés. Dimensions des fibres: "A": $l_f = 4$ cm, $d_f = 0,28$ mm; "B": $l_f = 3$ cm, $d_f = 0,9$ mm; "C": $l_f = 6$ cm, $d_f = 0,9$ mm. 54
- Photo III.2 : Fibres métalliques issues de pneus usés. Dimensions des fibres: "f₁": $l_f = 2$ cm, $d_f = 0,28$ mm; "f₂": $l_f = 3$ cm, $d_f = 0,28$ mm. 54
- Photo III.3 : Machine d'essai de traction 56

Chapitre IV

- Photo IV.1 : L'état des éprouvettes après écrasement en flexion et compression. 87
- Photo IV.2 : Eprouvette après écrasement, montrant le pontage des fissures par des fibres métalliques issues de pneus usés. 87

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Remerciements

Résumés

Liste des abréviations, des figures, des tableaux et des photos

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	2
<i>Chapitre I : Généralités sur les fibres et les déchets pneumatiques</i>	6
I.1. Introduction	7
I.2. Fibres utilisées comme renfort dans les bétons	8
I.2.1. Fibres de verres	8
I.2.2. Fibres synthétiques	8
I.2.3. Fibres végétales	10
I.2.4. Les fibres métalliques	10
I.2.4.1. Les fibres Fibraflex (fibres de fonte amorphe)	12
I.2.4.2. Les fibres Harex	12
I.2.4.3. Les fibres Dramix	13
I.2.4.4. Les fibres euro-steel	13
I.2.4.5. Les fibres Novocon® FE0730	13
I.2.4.6. Les fibres Ruban en fonte amorphe de Pont -à- Mousson	13
I.3. Déchets de pneumatiques	13
I.3.1. Composition et constituants d'un pneu	14
I.3.2. Effets des déchets de pneumatiques sur l'environnement	15
I.3.3. Valorisation des déchets de pneumatiques	16
I.3.4. Conclusion	18
<i>Chapitre II : Généralités sur les bétons et les bétons de fibres</i>	19
II.1. Introduction	20
II.2. Historique	21
II.3. Utilisation du béton de sable	22
II.4. Composition des bétons de sable	23
II.4.1. Ciments	23
II.4.2. Les Granulats	23

II.4.2.1. Les sables	24
II.4.3. L'eau	24
II.4.4. Les adjuvants	25
II.4.4.1. Rôle des adjuvants	25
II.4.5. Les ajouts	26
II.4.5. 1. Les fillers	26
II.4.5.2. Les fibres	27
II.5. Formulation du béton de sable	27
II.5.1. Principe de formulation	28
II.6. Bétons de fibres métalliques	28
II.6.1. Fibres	28
II.6.1.1. Rôle des fibres	28
II.6.1.2. Action des fibres métalliques dans la matrice cimentaire	29
II.6.1.3. Impact des fibres métalliques sur le béton frais (Maniabilité)	29
II.6.2. Composition des bétons de fibres métalliques	30
II.6.3. Formulation des bétons de fibres métalliques	30
II.6.3.1. Maniabilité des bétons de fibres	32
II.6.3.1.1. Influence de la géométrie des fibres	32
II.6.3.1.2. Influence du dosage en fibres	33
II.6.3.1.3. Influence de la granulométrie du mélange	33
II.6.4. Fonctionnement et mécanisme de rupture des bétons de fibres	34
II.6.4.1. Fonctionnement mécanique des fibres métalliques dans les bétons	34
II.6.4.2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres	34
II.6.5. Propriétés des bétons de fibres métalliques	35
II.6.5.1. Comportement en compression du béton de fibres métalliques	36
II.6.5.2. Comportement en traction du béton de fibres métalliques	37
II.6.5.3. Comportement en flexion du béton de fibres métalliques	38
II.6.5.4. Comportement sous sollicitations impulsionnelles (chocs)	39
II.6.5.4.1. Influence de l'orientation des fibres	39
II.6.5.5. Retrait et fluage	41
II.6.5.5.1. Le retrait	42
II.6.5.5.2. Fluage	43
II.6.5.6. Durabilité	44
II.6.5.7. Résistance au feu	44

II.7. Conclusion	45
Chapitre III : Matériel et méthodes	
III.1. Introduction	48
III.2. Choix des matériaux utilisés	48
III.3. Matériaux utilisés	49
III.3.1. Sable	49
III.3.2. Ciment	49
III.3.2.1. Surface spécifique	50
III.3.2.2. Temps de prise	51
III.3.2.3. Caractéristiques chimiques	51
III.3.2.4. Composition minéralogique du clinker	51
III.3.2.5. Indice d'hydraulicité	52
III.3.2.6. Caractéristiques mécaniques	52
III.3.3. Eau de gâchage	53
III.3.4. Les fibres	53
III.3.5. Les adjuvants	54
III.3.5.1. Caractéristiques des adjuvants utilisés	55
III.4. Méthodes utilisées dans la caractérisation des matériaux	55
III.4.1. Sable	55
III.4.1.6. Morphoscopie des grains de sable	55
III.4.1.7. Analyse minéralogique par diffractométrie à rayons X (DRX)	55
III.4.2. Fibres	56
III.4.2.1. Masse volumique absolue	56
III.4.2.2. Essai de traction sur les fibres	56
III.5. Béton	57
III.5.1. Formulation des bétons	57
III.5.1.1. Formulation du béton de sable de dunes	57
III.5.1.2. Formulation du béton de sable de dunes corrigé	59
III.5.2. Caractéristiques du béton à l'état frais	61
III.5.2.1. Les essais d'ouvrabilité	61
III.5.2.1.1. Essai de l'étalement à la table à secousses (Flow test)	61
III.5.2.1.2. L'essai Vébé	62
III.5.2.1.3. Essai au maniabilimètre (LCPC)	62
III.5.3. Caractéristiques du béton à l'état durcis	63

III.5.3.1. Essai de résistance mécanique	63
III.5.3.1.1. Essai de traction par flexion	63
III.5.3.1.2. Essai de compression	64
III.5.3.2. Propriété rhéologique (retrait)	64
III.5.3.2.1. Essai de retrait	64
III.6. Conclusion	65
<i>Chapitre IV : Résultats et discussions</i>	
IV.1. Introduction	67
IV.2. Etude des propriétés du béton de sable de dunes	67
IV.2.1. Etude des propriétés des matériaux utilisés	67
IV.2.1.1. Propriétés physiques du sable de dunes	68
IV.2.1.2. Propriétés physiques et mécaniques des fibres issues des pneus usées	69
IV.2.2. Les propriétés du béton frais	71
IV.2.2.1. Maniabilité	71
IV.2.3. Propriétés mécaniques du béton de sable de dunes	73
IV.2.3.1. Résistance à la compression	73
IV.2.3.1.1. L'effet du pourcentage et de la longueur des fibres métalliques	73
IV.2.3.1.2. L'effet de l'élanement (l/d)	79
IV.2.3.1.3. L'effet de la rigidité des fibres	81
IV.2.3.2. Résistance à la flexion	83
IV.2.3.2.1. L'effet du pourcentage et de la longueur des fibres métalliques	83
IV.2.3.2.2. L'effet de l'élanement (l/d)	89
IV.2.3.2.3. L'effet de la rigidité des fibres	91
IV.3. Etude des propriétés du béton de sable de dunes corrigé	93
IV.3.1. Propriétés des matériaux utilisés	93
IV.3.1.1. Propriétés physiques	93
IV.3.1.2. Etude morphoscopique	95
IV.3.1.3. L'analyse minéralogique (DRX)	95
IV.3.2. Les propriétés du béton frais	98
IV.3.2.1. Ouvrabilité	98
IV.3.3. Propriétés mécaniques	100
IV.3.3.1. Résistance à la compression	100
IV.3.3.2. Résistance à la flexion	104
IV.3.4. Propriété rhéologique (retrait)	108

IV.3.4.1. Retrait de séchage du béton	108
IV.3.4.1.1. L'effet de la correction granulométrique	108
IV.3.4.1.2. L'effet de l'addition des fibres	109
IV.3.5. Perte en poids	115
IV.3.5.1. Evolution de la Perte en poids en fonction du temps	115
IV.3.5.2. Evolution du retrait en fonction de la perte en poids	117
IV.4. Conclusion	120
<i>Conclusion générale</i>	123
Références bibliographiques	129
Annexes	144

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La relation harmonieuse entre l'Homme et son milieu naturel, a duré pendant des milliers d'années, du fait, que l'Homme a toujours respecté l'ordre établi par la nature ou parfois il est allé jusqu'à l'idolâtrie, en élevant certains de ces éléments au rang des Dieux. Et cela jusqu'au jour où ce pacte a été interrompu, laissant la place à la cupidité en ouvrant une nouvelle ère de désordre et de tourment. C'est l'avènement de l'ère industrielle marquée par l'utilisation irrationnelle voire abusive de toutes les ressources naturelles, ayant comme conséquence de graves préjudices pouvant aller jusqu'à l'anéantissement de la vie sur terre.

C'est à partir de ce constat alarmant qu'un engagement effectif des nations y a juste quelques décennies a été amorcé, pour tenter d'éviter les préjudices, qui peuvent être causés par un développement tous azimuts, sans autant se préoccuper des conséquences qui en découlent. Cependant, une grande partie du monde et en particulier les pays les plus industrialisés continuent à ignorer ces faits dévastateurs, qui sont aujourd'hui plus qu'une réalité une urgence. Pour remédier à cette situation la contribution des classes éclairées est inéluctable à savoir : société civile, politiciens et en particulier la communauté scientifique, où cette dernière peut se constituer comme un rempart inébranlable devant toute tentative ayant trait à rendre la vie difficile sur terre voir impossible. Sans être pessimistes nous n'avons qu'une lueur d'espoir, afin qu'une prise de conscience soit généralisée pour endiguer ce désastre, qui est peut-être devenu irréversible.

Enfin, en commençant à prendre conscience du danger dont nous nous exposons, de plus en plus, l'orientation de la recherche vers l'utilisation de nouveaux matériaux, ayant un impact positif sur l'environnement s'avère plus que nécessaire.

Dans ce même ordre d'idées, nous avons pensé à une contribution que nous jugeons intéressante, plus particulièrement dans le domaine de la construction. Il s'agit d'une valorisation d'un matériau local en l'occurrence le sable de dunes et d'un déchet industriel se résumant à des fibres métalliques issues de pneus usés.

L'Algérie pays appartenant à l'Afrique du nord, possède d'énormes réserves en sable de dunes. Toutefois, son utilisation plus particulièrement dans le domaine de la construction, même sans l'apport des statistiques officielles est presque insignifiante. Il est néanmoins important de

souligner qu'il y a un intérêt croissant ces derniers temps (Al-Harthy et al., 2007; Bederina et al., 2007; Bederina et al., 2009; El Euch Khay et al., 2010; Guettala et Mezghiche, 2011; Belferrag et al., 2013; Bouaziz et al., 2013; Belferrag et al., 2016) pour l'utilisation du sable de dunes dans la formulation du béton, afin de lui forgé une place en tant que matériau à part entière. Pour ce faire, nous avons pensé d'une part à l'introduction des fibres d'acier dans la formulation du béton de sable de dunes et d'autre part à la correction de la granulométrie de ce dernier, contribuant ainsi à l'amélioration des propriétés à la fois, mécaniques et rhéologiques.

Nombreuses sont les études qui ont été effectuées sur la valorisation des fibres, ayant un faible coût tels que les fibres végétales (sisal, palmier, coton, lin, chanvre...). Dans ce travail, nous avons eu l'idée d'utiliser des fibres métalliques issues de pneus usés, se caractérisant par leur faible coût et leur impact négatif sur l'environnement. Il s'agit d'une valorisation d'un déchet industriel, en l'occurrence les pneus usagés disponibles en grandes quantités, du fait de leur relation directe avec l'industrie automobile qui présente une source intarissable.

Les principes du développement durable et bâtiments verts ont pénétré le secteur de la construction à un rythme accéléré ces dernières années (Meyer, 2009). En particulier, en raison de son énorme impact sur l'environnement, l'industrie du béton a un long chemin à parcourir pour se débarrasser de son image négative (Meyer, 2009). La surabondance des pneus usés engendrées par le parc roulant de part le monde, est évaluée à des centaines de millions, posant ainsi un sérieux préjudice à l'environnement. En raison de la menace pour l'environnement associée à des déchets de pneus, leur élimination appropriée attire beaucoup d'attention ces dernières années (Papakonstantinou et Tobolski, 2006).

L'utilisation efficace des déchets des copeaux de pneus et fibres dans le béton pourraient fournir un des moyens écologiquement sain et économiquement durable pour transformer ces déchets en une ressource précieuse (Senthil Kumaran et al., 2008).

De nombreuses études (Li et al., 2004 a ; Li et al., 2004 b ; Turatsinze et al., 2005 ; Nguyen et al., 2010 ; Chang Guo et al., 2014) se sont intéressées au recyclage de déchets pneumatiques plus particulièrement la partie caoutchouc. Seulement, très peu de travaux ont été consacrées à l'usage des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques (Belferrag et al., 2007 ; Aiello et al., 2009 ; Centonze et al., 2012; Belferrag et al., 2013 ; Belferrag et al., 2016).

Le sable de dunes est disponible en grande quantité au Sahara, où est enregistrée une déficience accrue en matière de granulats destinés à la fabrication du béton. A cela, s'ajoute le facteur de l'éloignement des régions sahariennes des endroits d'approvisionnement en matière de

granulats, qui rend encore plus onéreux la valeur des granulats. De ces faits, le sable de dunes pourrait présenter un avantage économique sûr. Néanmoins, le côté technique laisse paraître que ce matériau présente des anomalies nécessitant des traitements ou des transformations, et ne peut être utilisé à l'état brut.

De ces anomalies naissent le désir à la recherche d'une solution pour l'intégration de ce matériau dans la confection des bétons. Plusieurs études (Al-Harthy et al., 2007 ; Tafraoui, 2009 ; El Euch Khay et al., 2010 ; Guettala et Mezghiche, 2011 ; Abu Seif, 2013a ; Abu Seif, 2013b ; Belferrag et al., 2013) réalisées sur les sables de dunes témoignent que ce matériau présente une granulométrie très fine, ayant comme conséquence un retrait important du béton. Associer au climat chaud et sec caractérisant les zones Sahariennes, ce phénomène s'amplifie davantage, pouvant ainsi influencer négativement sur la durabilité du béton. En effet, la réduction de la durabilité du béton est l'un des problèmes majeurs causés par les conditions climatiques sévères avec des températures très élevées (Maslehuddin et al., 2013).

Selon les conditions réelles de la formulation du béton, le choix des constituants et de leurs caractéristiques présente souvent un handicap, du fait du manque voir la non disponibilité des matériaux, se répercutant sur l'ensemble des propriétés et qui influe davantage sur la résistance des bétons, plus particulièrement le phénomène du retrait qui est caractérisé par la propagation des fissures au sein de la matrice cimentaire.

Le renforcement par les fibres métalliques est l'une des solutions pouvant remédier aux anomalies du béton en général et du béton de sable en particulier. Ces fibres peuvent contribuer à l'amélioration de l'ensemble des propriétés à la fois mécaniques et rhéologiques des bétons. Du fait que l'ajout des fibres métalliques influence le comportement des bétons, en leur procurant plus de résistance vis-à-vis la fissuration, ce qui revient à changer leur attitude à la rupture. Au fait, les bétons fibrés ont une conduite très différente comparativement aux bétons non fibrés, spécialement après la première fissuration où les fibres apportent leur contribution en essayant d'arrêter l'évolution et la propagation des microfissures au sein de la matrice en rendant le béton plus ductile.

L'amélioration des propriétés mécaniques du béton par l'ajout des fibres métalliques est influencée par plusieurs paramètres à savoir : l'orientation des fibres, la qualité du béton et les propriétés des fibres (type, volume, élancement,...). En effet, concernant le comportement des fibres métalliques dans le béton en compression, plusieurs études ont été réalisées (Luo et al., 2001; Giaccio et Zerbino, 2005; Bentalha, 2007; Bentalha et Houari, 2007; Yang et al., 2007;

Holschemacher et al., 2010) montrant l'amélioration de cette caractéristique du béton par l'ajout des fibres. Egalement, pour le comportement des bétons renforcés de fibres métalliques à la flexion, nombreux sont ceux qui témoignent de leur influence positive (Yazıcı et al., 2007 ; Olivito et Zuccarello 2010 ; Dawood et Ramli 2012 ; Samanci 2012 ; Wu et al., 2016).

Les mêmes paramètres qui gouvernent l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres influent aussi d'une manière ou d'une autre sur le retrait.

Selon Zhang et Li (2001), le retrait conduit généralement à des fissures dans les structures en béton, en plus ces dernières exercent une influence sur la durée de vie des structures. Pour contrer ce phénomène de retrait Ji et al. (2012), suggèrent l'ajout de fibres d'acier, afin d'améliorer le comportement résistant à la fissuration du béton. Dans le même contexte, plusieurs auteurs (Swamy et Stavrides, 1979; Managat et Azari, 1984; Chern et Young, 1989; Grzybowski et Shah, 1990 ; Chen et Liu, 2004; Corinaldesi et Moriconi, 2004; Chen et Liu, 2005; Atis et Karahan, 2009; Sounthararajan et Sivakumar, 2013) démontrent dans leur études respectives qu'il y a une réelle contribution de l'introduction des fibres à la réduction du retrait du béton.

Les principaux objectifs de cette étude sont de déterminer l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes (afin de recycler un matériau local disponible en grande quantité et à faible coût) et l'ajout de fibres métalliques issues de pneus usés (valorisation d'un déchet industriel) sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le *premier* et le *deuxième chapitre* concernent la partie théorique où sont traités l'ensemble des paramètres ayant trait aux constituants élémentaires des mélanges et les caractéristiques mécaniques et rhéologiques des bétons.

Dans le *troisième chapitre* intitulé matériel et méthodes, nous présentons les constituants utilisés dans la formulation du béton de sable, ainsi que les différentes méthodes destinées à la caractérisation physique, mécanique et rhéologique des constituants et des bétons de sable.

Le *quatrième et le dernier chapitre* est consacré aux résultats et discussion de l'ensemble des propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques des bétons de sable.

Enfin, on terminera par une conclusion générale suivie des recommandations et perspectives.

CHAPITRE 1

Généralités sur les fibres et déchets
pneumatiques

Généralités sur les fibres et les déchets pneumatiques

I.1. Introduction

Le besoin d'innover est devenu plus qu'un plaisir, c'est désormais une nécessité pour l'ensemble des chercheurs, et une garantie de pérennité pour les entreprises chacune dans son domaine. Le passage vers les matériaux composites durant le vingtième siècle, a ouvert la voie vers l'amélioration des caractéristiques de ces derniers, par la mise au point de produits composites renforcés par des fibres. Leurs utilisations dans divers domaines à savoir : le génie civil, la mécanique (constructions automobiles, aérospatiales et maritimes...) et autres a offert la possibilité d'anticiper certains obstacles qui ralentissent le développement et l'amélioration des caractéristiques mécaniques ou techniques des matériaux.

Convaincu de leurs succès les chercheurs dans divers domaines tentent d'utiliser des fibres de différentes natures et caractéristiques pour justifier leur diffusion en particulier dans le domaine de la construction.

Mais loin de gagner la bataille, l'utilisation des fibres doit non seulement justifier l'amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologiques des bétons, mais aussi sur le plan économique (coût), qui est un paramètre préférentiel de la majorité des partenaires, pour enfin pouvoir s'imposer dans le monde du marché.

De ce fait, l'idée d'une valorisation de déchets industriels devient nécessaire est inévitable pour produire à la fois des fibres à prix concurrentiels et participer au développement et à la protection de l'environnement qui est devenue le souci majeure de toute la planète, notamment pour les pays émergents qui possèdent une multitude de déchets industriels non valorisés.

I.2. Fibres utilisées comme renfort dans les bétons

Les fibres ne sont pas considérées parmi les constituants de base du béton et sont utilisées dans sa composition pour un meilleur contrôle de fissuration, par un renforcement de la contrainte de traction du béton, considérée comme faible (Vieira, 2015).

Plusieurs catégories de fibres sont actuellement présentes sur le marché à savoir : les fibres synthétiques (carbone, polyester, nylon, polypropylène...), de verres (sodocalcique, borosilicaté...), végétales (sisal, jute, noix de coco, palmier et bambou...) et métalliques (fil étiré à froid, inoxydable, galvanisé, ruban en fonte amorphe, tréfilé, tôle découpée...).

La nature et l'aspect divers des fibres, fait que ces dernières présentent des propriétés distinctes. Selon les objectifs recherchés, on peut faire la distinction entre les fibres possédant des résistances élevées (fibres de verres, d'acier, de carbone...) et les fibres ayant des résistances faibles (fibres végétales, propylène ...).

I.2.1. Fibres de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faible diamètre (quelques dizaines de microns), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques (Baron et Ollivier, 1996). Ces fibres sont utilisées dans la confection des panneaux préfabriqués, murs-rideaux, tuyaux d'égout, toiture en voile mince de béton et enduit pour bloc de béton (Beaudoin, 1982). Le tableau I.1 montre les différentes propriétés des fibres de verre.

Tableau I.1 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres de verres (Beaudoin, 1982).

Fibre	Diamètre (µm)	Densité	Allongement à la rupture (%)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (GPa)
verre	5-500	2,4	2-3,5	80	2-3

I.2.2. Fibres synthétiques

Pour les fibres synthétiques (Tableau I.2), on peut citer les fibres de carbone et de polypropylène ; les premières présentent un grand avantage vu leurs faible dimension, offrant ainsi la possibilité de fabriquer des composites ayant une haute teneur en fibres (Chaalal et Benmokrane, 1995). Quant au deuxième type, elles se présentent le plus souvent en faisceaux qui une fois introduits dans le matériau se séparent et se répartissent dans la masse du béton.

Tableau I.2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres synthétiques (ABQ, 2005).

Types de fibres	Diamètre équivalent $\times 10^{-6}$	Densité relative	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Pourcentage d'allongement à la rupture	Température d'inflammation (°C)	Température de décomposition (°C)	Absorption d'eau % en masse
Acrylique	5-17	1,16-1,18	200-1000	14000-19000	7,5-50	-	220-235	1,0-2,5
Aramide I	12	1,44	2900	62000	4,4	élevée	480	4,3
Aramide II (module élevé)	10	1,44	2340	120000	2,5	élevée	480	1,2
Carbone I	8	1,6-1,7	2480-3030	380000	0,5-0,7	élevée	400	nul
Carbone II	9	1,6-1,7	3445-4000	230000	1,0-1,5	élevée	400	nul
Carbone III	10-13	1,6-1,7	480-795	27000-35000	2,0-2,4	élevée	400	3-7
Carbone IV	9-18	1,8-2,15	1515-3100	150000-480000	0,5-1,1	élevée	500	nul
Nylon	23	1,14	1000	5200	20	-	200-220	2,8-5
Polyester	10-80	1,34-1,39	220-1100	17000	12-150	590	255	0,4
Polyéthylène	25-1000	0,92-0,96	80-600	5000	3-80	-	135	nul
Polypropylène	20-200	0,90-0,91	140-700	3400-4800	15	590	165	nul

Carbone I = à base de polyacrylonitrile, module élevé.

Carbone II = à base de polyacrylonitrile, résistance à la traction élevée.

Carbone III = basé sur un angle isotropique élevé, usage général.

Carbone IV = basé sur un angle mésophase à haute performance

Elles sont surtout utilisées dans la fabrication de pieux de fondation, de panneaux de revêtement, d'éléments flottants de débarcadère et amarres pour les marines, de matériaux de réparations des routes, et de couches de lest pour les tuyaux sous marins (Beaudoin, 1982).

1.2.3. Fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres naturelles destinées, comme les autres types de fibres à améliorer les caractéristiques mécaniques du béton à la traction et à la déformation en s'opposant à sa fragilité. Elles sont classées en quatre groupes suivant leurs provenances à savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface et sont utilisées généralement dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et du béton (Kriker, 2005). Le tableau I.3 présente les propriétés des fibres végétales.

Tableau I.3 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales (Do Thi, 2011).

Fibre	Densité (g/cm ³)	Déformation (%)	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Jute	1,30	1,2-3,0	300-700	20-50
Sisal	1,50	2,0-5,0	300-500	10-30
Coco	1,20	20-40	150-180	4,0-6,0
Chanvre	1,48	1,6-4,0	350-800	30-60
Bambou	1,40	~2	500-740	30-50
Kénafe	1,30	1,7-2,1	400-700	25-50
Lin	1,45	1,5-4,0	500-900	50-70
Palmier*	0,51-1,09	-	170-290	-

* (Kriker et al., 2005)

1.2.4. Les fibres métalliques

Les fibres métalliques sont parmi les fibres les plus commercialisées, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (Figure I.1). Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 (GPa), une masse volumique de 7,85 t/m³ et une résistance à la traction de 1 à 2 (GPa). Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élanement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6,4 à 76 mm. Le pourcentage volumique de fibres métalliques dans le béton varie de 0,3 à 3%. L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur et de la forme a donné lieu à de nombreuses études (Haouari, 1993).

Pour des usages particuliers, certaines fibres utilisées sont inoxydables ou traitées contre la corrosion. Leur principal avantage est une amélioration de la résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure (Dreux et Festa, 1998). De ces avantages, découlent les principaux domaines d'utilisation : en particulier les dallages industriels, les ouvrages coulés en place tels que les pieux, piste d'aéroport, revêtement de tunnel, soutènement; ces deux dernières applications font appel à la technique des bétons projetés, les voussoirs de tunnel préfabriqués sur site, les produits en béton manufacturé tels que pannes, panneaux de façade, pré cadre de baies (Chaalal et Benmokrane, 1995).

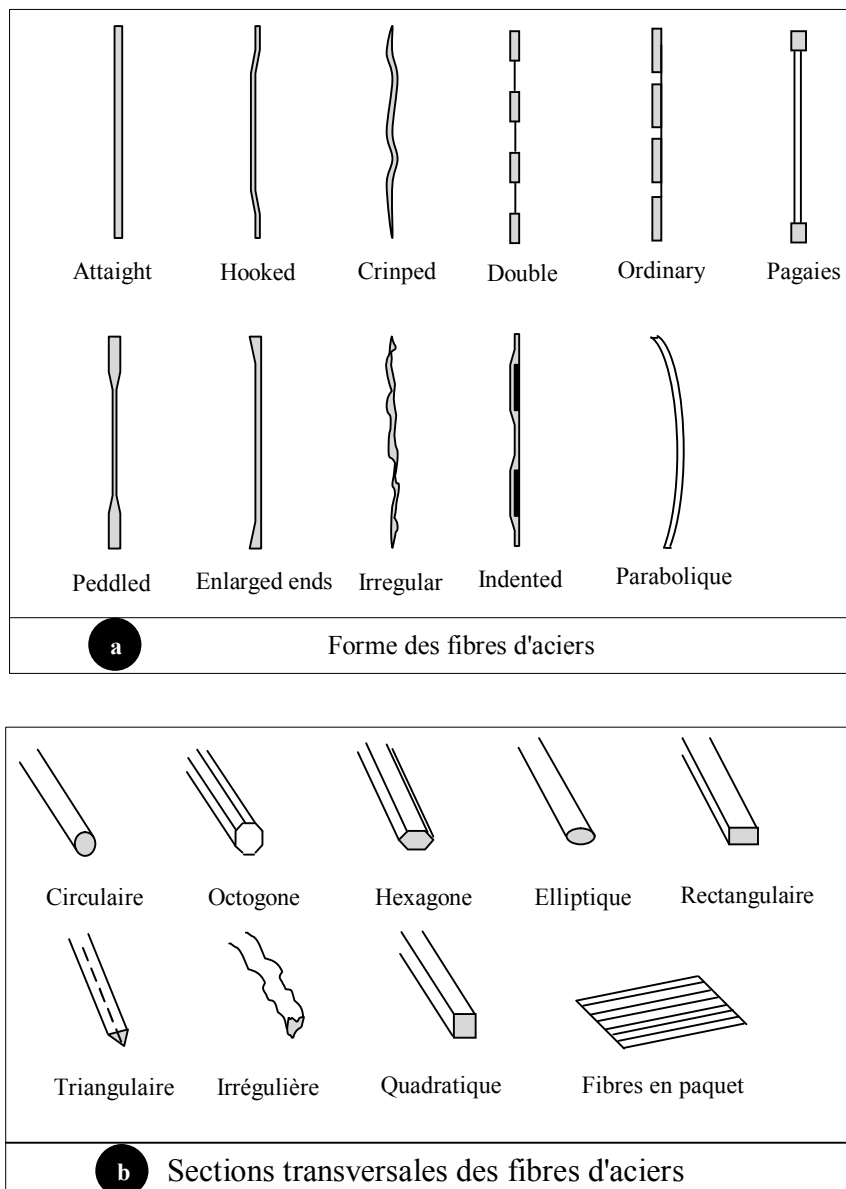


Figure I.1 : Géométrie des fibres métalliques (formes et sections variables) (Haouari, 1993; Løfgren, 2005).

La recherche de l'adhérence et d'une bonne compatibilité avec le béton a donné naissance à une grande variété de fibres métalliques (Figure I.1), susceptibles, par leurs formes ou leurs états de surfaces de mieux s'ancrer dans le béton avec une bonne adhérence au niveau de l'interface matrice-fibres.

A ce propos nous citons les fibres métalliques les plus utilisées ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres métalliques

Type de fibres	Référence	D (mm)	e (mm)	l (mm)	L (mm)	R _t (MPa)
Dramix	(Chanvillard, 1993)	0,4-0,8	-	25-60	-	> 1050
Novocon	(Chanvillard, 1993)	0,7	-	30	-	1400
Ruban en fonte amorphe	(Casanova, 1996)	-	0,03	15-60	1,5-2	200
Fibraflex (fibres de fonte amorphe)	(Mahmoud, 2005)	-	-	5-30	1-1,6	≥1400
Harex	(Djebali, 2013)	-	0,25	32	2	≈ 700
Euro-steel	(Djebali, 2013)	0,8-1	-	50-60	-	1400

D : Diamètre, e : Epaisseur, l : Longueur, L : Largeur, R_t : Résistance à la traction

I.2.4.1. Les fibres Fibraflex (fibres de fonte amorphe)

De part leur souplesse, elles sont facilement incorporées dans le béton, que l'on peut ensuite couler, pomper ou projeter sans problème. La présence de chrome dans l'alliage donne à Fibraflex une grande résistance à la corrosion; elles présentent aussi une résistance à la traction remarquable qui est supérieure ou égale à 1400 MPa (Mahmoud, 2005).

I.2.4.2. Les fibres Harex

La fibre Harex a été spécialement conçue pour une utilisation en armatures de chapes. Ce type de fibre optimise la qualité et l'ouvrabilité des chapes. Celle-ci est obtenue par fraisage. Les copeaux produits légèrement enroulés sur eux même, possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPa (Ait Ameer, 1998).

I.2.4.3. Les fibres Dramix

Ces fibres en acier tréfilé se présentent sous forme de plaquettes encollées, ce qui facilite l'introduction dans le béton et évite la formation d'oursin (la colle se dissout dans l'eau de gâchage). La fibre comporte à chacune de ses extrémités un façonnage en forme de baïonnette appelé «crochet» destiné à favoriser son ancrage dans le béton qui développe progressivement un ancrage puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci ainsi que par frottement à l'interface avec la matrice (CSTB, 2014).

I.2.4.4. Les fibres euro-steel

Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilé, dur, à teneur en carbone inférieure à 0,15%. La contrainte limite de rupture en traction est de 1400 (MPa) (Ait Ameer, 1998).

I.2.4.5. Les fibres Novocon® FE0730

Les fibres Novocon, anciennement appelées Novotex, sont conçues spécifiquement pour le renforcement des bétons, mortiers et autres mélanges cimentaires. Novocon est une fibre tréfilée à froid, déformée avec des extrémités plates, fournissant des performances optimales dans le mélange de béton (Product data sheets, 2008).

I.2.4.6. Les fibres Ruban en fonte amorphe de Pont -à- Mousson

Les fibres ruban en fonte amorphe sont obtenues par refroidissement brutal, cette trempe crée une structure vitreuse qui est en partie à l'origine de sa résistance à la corrosion. La mise en œuvre de ces fibres ne possède pas de problème particulier quant au béton coulé sur place, pourvu que les dosages restent inférieurs à 0,75%. Par contre, on peut introduire jusqu'à 1% de fibres dans un béton de sable. Mais, il faut savoir que l'une de leurs caractéristiques importantes est leur grande résistance à la corrosion (Casanova, 1996).

I.3. Déchets de pneumatiques

Les déchets de pneumatiques représentent une source intarissable du fait de la relation directe avec la construction automobile et d'engin divers ; constituant un marché en plein extension ayant un rapport avec la croissance économique et démographique. Le rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux pneumatiques usagés, étude réalisée pour le compte de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) indique, qu'en Europe, le secteur de la production de pneus regroupe 4 200 entreprises et emploie 360 000 salariés. 4,6 millions de tonnes de pneumatiques ont été produits en 2012, soit environ 252 millions de pneus

tourisme, camionnettes et SUV (Sport Utility Vehicle) et 9,6 millions de pneus poids lourds pour un chiffre d'affaires de 28,2 milliards d'euro. La production européenne représente 21% de la production mondiale (Ernst et Young, 2014). Les 79% soit 17,3 millions de tonnes de pneumatiques sont produits par le reste du monde, ce qui donne une production mondiale annuelle de l'ordre de 21,9 millions de tonnes. Sachant que le poids moyen d'un pneu pour un véhicule léger est de 7 kg ce qui donne un nombre de 3,13 milliards de pneus.

I.3.1. Composition et constituants d'un pneu

Les constituants d'un pneu sont présentés sur la figure I.2. Peu importe où ils sont produits, tous les pneus contiennent quatre groupes fondamentaux de matériaux: les caoutchoucs naturels et synthétiques, les noirs de carbone/silices, les matériaux de renforcements (métaux/textiles) et les facilitateurs utilisés durant les divers stades de la production des pneus (cires, antioxydants...) (Shulman, 2004; Shulman, 2011).



Figure I.2 : Les constituants d'un pneumatique (points68, 2014).

Tableau I.5 : Composition moyenne de pneu de véhicules utilitaires et de poids lourd en Europe (Shulman, 2011).

Matériaux /éléments	Pourcentage massique (%)	
	Véhicule utilitaire	Poids lourd
Caoutchoucs	±45	±42
Noir de carbone	±23	±24
Acier	±16	±25
Textile	±6	±4
Oxyde de zinc	±1	±2
Soufre	±1	±1
additif	±8	±4

I.3.2. Effets des déchets de pneumatiques sur l'environnement

Le développement et l'accroissement du parc automobile génère chaque année des centaines de millions de pneus usagés de par le monde, causant ainsi de graves préjudices à l'environnement. Avec l'éveil de la communauté internationale nous assistons ces dernières décennies de plus en plus à une évolution de la réglementation, qui encadre et gère les divers problèmes engendrés par les déchets pneumatiques. Néanmoins, une grande quantité de déchets reste sans valorisation, en particulier dans les pays sous développés et émergents provoquant de sérieux problèmes environnementaux. A l'image des incendies provoqués dans des stocks de pneus (Photo I.1). Si ces derniers sont brûlés le toxique produit endommagera l'environnement et provoque une pollution atmosphérique par l'émission de dioxyde de carbone et de gaz à effet de serre. Comme les pneus sont considérés comme un matériau non biodégradable ils peuvent affecter aussi la fertilité du sol et la végétation (Kumaran et al., 2008).

D'un autre côté les décharges de pneus sont inesthétiques (Photo I.2) et constituent des risques importants pour la santé favorisant la propagation des moustiques (Meyer, 2009) et des rongeurs se traduisant par une prolifération de maladies.



Photo I.1 : Incendie de cinq millions de pneus au Koweït (Alsultan, 2012).



Photo I.2 : 8.500 tonnes de pneus qui débordent, en lisière du petit village bucolique de Campsas (Aliapur, 2007).

I.3.3. Valorisation des déchets de pneumatiques

Le XIX^{ème} siècle, c'est l'entrée dans l'ère industrielle. Les hommes sans aucune limite cherchent la suprématie et le profit au détriment de toutes les considérations, en particulier le respect de l'environnement, longtemps considéré comme négatif et contraire au développement. La prise de conscience est survenue lorsqu'enfin, nous avons compris que le développement durable ne

peut se faire qu'avec une réelle protection de la nature. Dans ce même contexte, la gestion des déchets en générale et celle des pneus en particulier nécessite une bonne prise en charge de la part des industriels premiers pollueurs. Cependant, cette tâche ne peut se faire qu'avec un investissement dans ce domaine qui s'est avéré avec le temps rentable à la fois sur le plan économique et social. De là, des entreprises spécialisées dans la valorisation des déchets industriels sont créés et en particulier des filières de valorisation des pneus. Selon Shulman (2011), les marchés pour les matériaux recyclés ont augmenté de façon exponentielle au fil des ans.

Plusieurs filières de traitement sont utilisées dans la valorisation des déchets de pneumatiques de par le monde on trouve le réemploi, la valorisation énergétique, la valorisation en matière et la valorisation en travaux publics, à titre d'indication on peut citer les taux de valorisation des principaux pays producteurs d'automobiles. L'Europe possède un taux de valorisation des déchets de pneumatiques de 76%, contre 61% pour le Japon et 82% pour le Brésil et les États-Unis (Ernst et Young, 2014). Mais contrairement à ces pays, l'Europe qui privilégie la valorisation en matière, a moins recours à la valorisation énergétique, elle se place dans les dernières, avec uniquement 38%, loin derrière la Corée du Sud, le Brésil, le Japon et les Etats-Unis, tous supérieurs à 50% de valorisation énergétique. La figure I.3, présente les quantités de déchets de pneumatiques dans le monde et leurs filières de valorisation (Ernst et Young, 2014).

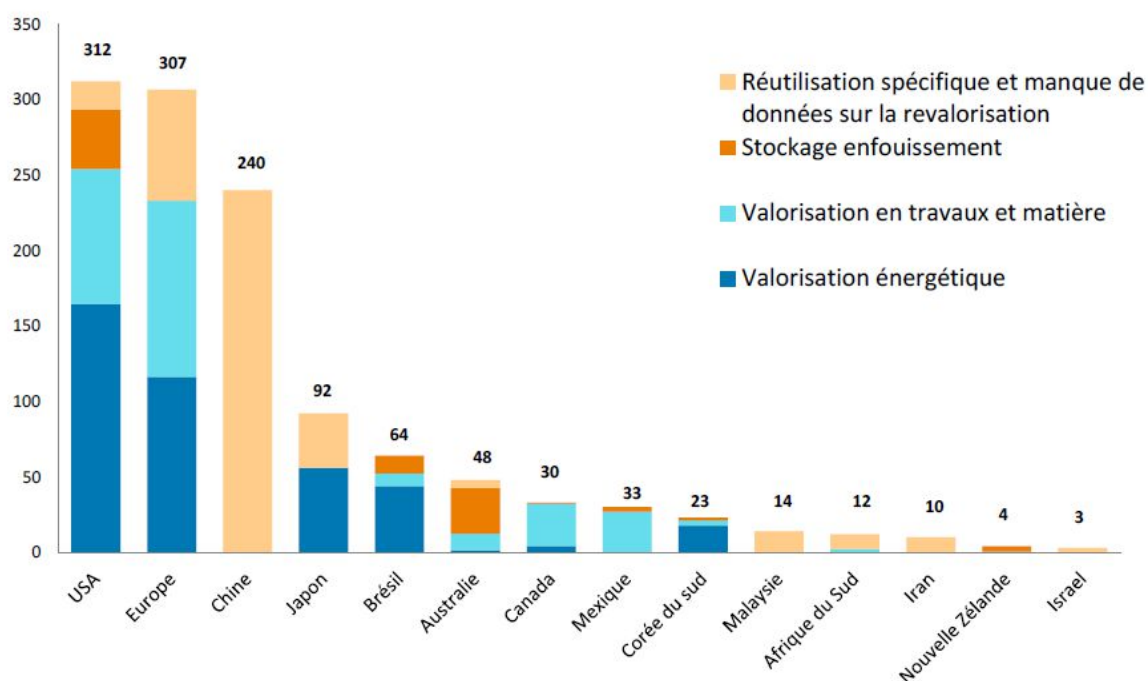


Figure I.3 : Quantités de déchets de pneumatiques (en millions de pneus) et filières de valorisation dans le monde (Ernst et Young, 2014).

Quant à la valorisation de la partie métal c'est dans les trois pays ; Les Pays-Bas, le Portugal et l'Espagne ; où l'importance de la valorisation matière vient essentiellement de la grande diversité d'applications des pneus granulés. En effet, en supplément de la partie caoutchouteuse, l'acier est récupéré et peut être revendu à des aciéries pour recyclage (Ernst et Young, 2014).

Les pneus entiers sont utilisés dans une large gamme d'applications de génie civil en raison de leurs propriétés physiques uniques. Par rapport à beaucoup de matériaux traditionnels, les pneus sont légers, relativement compressibles et exercent une faible conductivité thermique. Ils sont particulièrement adaptés à des installations sur des bases de sol humide ou instables qui nécessitent des matériaux légers (Shulman, 2011).

La couche de roulement en asphalte formulée avec l'ajout de caoutchouc de pneus usés à l'avantage de réduire le bruit, les vibrations, le dérapage, le brouillard et les reflets, ainsi que la pénétration du gel (Shulman, 2011).

I.3.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis l'accent au premier lieu sur les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées dans le domaine de la construction. Par la suite nous avons essayé d'abordés les problèmes causés par les déchets de pneumatiques plus particulièrement leurs effets sur l'environnement. Enfin, l'ensemble des solutions proposées dans le monde pour la valorisation de ces déchets.

CHAPITRE 11

Généralités sur les bétons et les bétons de fibres

Généralités sur les bétons et les bétons de fibres

II.1. Introduction

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou par un faible dosage en gravillon. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par son domaine d'application. L'emploi de béton de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante de structure rigide intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et à un coût moindre que les granulats courants (Fauteux et Fortin, 2002).

Néanmoins, l'utilisation des bétons de sable peut être confrontée au problème de retrait et de fissuration, pour cela aujourd'hui les bétons de sable sont de plus en plus renforcés par diverses fibres, les plus courantes sont celles de verre, d'acier, de polypropylène et de carbone.

L'association des fibres avec les bétons de sables ou mortiers est un procédé relativement récent à l'exception de la fibre d'amiante qui a été utilisée avec le mortier depuis le début du XX^{ème} siècle, avec l'invention du procédé Hatschek en 1898 (ACI, 1996).

Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armatures en acier jouent le rôle analogue, car elles agissent comme une fibre de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme (Beaudoin, 1982), créant ainsi un réseau solidaire pouvant contribuer à faire stopper la propagation des fissures, ce qui conduit à une amélioration de la durabilité des bétons contenant des fibres.

Nombreuse sont les études faites sur les bétons fibrés ces dernières décennies, vu que l'objectif visé par ces pionniers été de chercher à remplacer les armatures traditionnelles de béton armé par ces fibres. Malheureusement, cet objectif n'a pas été atteint du fait, qu'un renforcement par un taux de fibres réduit, engendre un comportement mécanique faible, alors qu'un

renforcement par un taux élevé en fibres rend le coût des matériaux composites onéreux (Rossi, 1998). De ce fait, le coût et le domaine d'application des matériaux composites dépendent des types de fibres utilisées comme renforts.

II.2. Historique

Les Romains sont bien connus pour leur vaste utilisation du béton il y a plus de deux millénaires (Reed et al., 2008). Un enregistrement datant de cette époque (118-125 AD) encore en vigueur aujourd'hui, est le Panthéon de Rome présentant un excellent état après près de 2000 ans (Vieira, 2015).

Le vrai départ était lors de l'invention du ciment Portland en 1824 par un maçon britannique, J. Aspdin, établissant ainsi les bases pour le développement des structures en béton (Kurdowski, 2014; Gu et al., 2016). En 1855, un Français J. L. Lambot expose une chaloupe en béton armé avec des fils à l'exposition universelle de Paris, symbolisant la naissance de structures en béton armé (Gu et al., 2016). Dans la même année, F. Coignet a déposé également un brevet pour les dalles en béton armé. Dès lors, un grand nombre de structures en béton armé ont été fabriquées et ont été brevetés. Un manuel britannique publiée en 1904 répertorié 43 brevets sur le béton armé, dont 15 provenaient de France, 14 de l'Allemagne ou de l'Empire austro-hongrois, 8 des Etats-Unis, 3 au Royaume-Uni, et les brevets restants provenaient de 9 autres pays (Gu et al., 2016).

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel. Il trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré" qui n'est autre que l'ancêtre du béton de sable. Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

Plusieurs édifices ont été construits en utilisant un béton aggloméré, et qui ont résistés à travers le temps, certains subsistent jusqu'à aujourd'hui témoignant de la solidité et l'efficacité de ce matériau. Les exemples sont nombreux dont on peut citer la construction par Coignet qui est à l'origine de ce matériau des nouveaux locaux, en utilisant du mortier pilonné dans des coffrages qu'il appelle « pierre sans fin » et le phare de Port Saïd en Egypte. Cependant, la bataille n'est pas gagnée d'avance, puisque son béton était souvent l'apanage de beaucoup de critique. C'est à New York que Coignet verra son béton utilisé avec succès pour un ouvrage noble : le pont de Cleftridge, dans le parc de Brooklin, édifié par Calvert Vaux et John C. Goodridge. En effet, l'ouvrage se révèle à la fois très économique et de bonne facture esthétique (CIM béton, 2009).

Pour ne citer que cela, beaucoup d'ouvrages ont été réalisés par ce béton, jusqu'à l'avènement du XXème siècle, marqué par l'arrivé du béton utilisant des granulats de gros

calibres et du ciment à la place de la chaux, engendrant ainsi une amélioration de la résistance du béton. Mais malgré cette avancée, le béton demeure handicapé par sa faible résistance à la traction. Cela a conduit à la mise au point du béton armé, dont le matériau de structure très polyvalent que nous connaissons aujourd'hui (Urquhart, 2013).

L'utilisation des bétons renforcés de fibres métalliques remonte à la deuxième moitié du XIXème siècle. Depuis, ce composite a connu une évolution continue jusqu'à la moitié du XXème siècle, où ce dernier a pris une forme similaire à celle d'aujourd'hui.

Mimouni (1994) rapporte que les brevets sur les bétons renforcés par les fibres ont été établis pour la première fois en 1874 par Berard en Californie (USA). Il a suggéré l'ajout dans un mélange de béton de granulats en fer recint pour créer une pièce artificielle. Par la suite plusieurs brevets ont été établis dont celui de Weakly (USA) en 1912, de Kleinlogel (Allemagne) en 1920, de Martin et Meische-Smith (USA) en 1927 et de Etheridge (USA) en 1933.

Plusieurs procédés ont apparu dans différents pays dans les années suivantes. Celui de Constantinesco, Angleterre 1943, USA en 1954, mérite une attention particulière. Les paramètres de renforcements qu'il a recommandé à l'époque sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour les bétons armés de fibres. Son procédé recommande également l'emploi de fibres permettant l'augmentation de la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse du béton. Il a suggéré l'utilisation du béton armé de fibres dans la construction des pistes d'aéroports, fondations de machines et ouvrages similaires (Mimouni, 1994).

II.3. Utilisation du béton de sable

Les bétons de sable sont utilisés un peu partout dans le monde, les expériences de son utilisation diffèrent d'un endroit à l'autre. Cependant, la rareté des gros granulats présente un intérêt commun entre toutes ses expériences quelles soit en CEI (Communauté des Etats Indépendants) ex URSS, France, dans le nord Africain ou autres.

Le manque et parfois l'éloignement où les granulats doivent être transportés à travers de longue distance, conduit a des dépenses supplémentaires, allant parfois au triple du coût du matériau lui-même ; rendant ainsi l'utilisation du béton de sable à la fois efficace et rentable. En plus, un autre facteur résidant dans le souci du respect de l'environnement donne à ce matériau encore plus d'intérêt.

II.4. Composition des bétons de sable

Selon la norme NF P 18-500 de juin 1995, le béton de sable est composé essentiellement de granulats ayant un faible diamètre, de ciment, d'additions et d'eau ; outre ces composants de base, le béton de sable comporte habituellement un ou plusieurs adjuvants. L'incorporation de gravillons est possible tant que le rapport massique gravillons/sable reste inférieur à 0,7. La norme précise qu'on parle alors de béton de sable chargé. A l'inverse des bétons de sable, les bétons traditionnels emploient généralement des granulats 0/15 et 0/25 et comportent, selon l'utilisation envisagée, entre 250 et 400 kg de ciment par mètre cube de béton mais pour des raisons d'ouvrabilité, il ne convient pas de dépasser $G/S = 2$ à 2,2 pour des bétons courants (Dreux et Festa, 1998). Pour ces derniers, et vu l'utilisation de granulats de diamètre maximal, il n'est pas nécessaire de rajouter d'autres fines à part le ciment qui peut à lui seul assurer au béton une compacité maximale.

Toutefois, si on cherche à diminuer la valeur du diamètre au dessous de 16 mm, dans ce cas, et pour garder une compacité maximale, il faut augmenter le dosage en fines (ciment). Ceci se traduit par la règle reproduite par Chauvin et Grimaldi (1988), qui recommandent un dosage en ciment égale à $K / \sqrt[3]{D}$. Où "K" tient compte des environnements agressifs, variant entre 550 et 700, selon l'usage du béton.

Dans le cas des bétons de sable, l'étendue granulaire est bornée supérieurement à 5 mm par l'absence de gros granulats. Il paraît alors évident qu'un mélange ciment-sable présentera une porosité plus élevée que la porosité d'un béton traditionnel (Chanvillard et Basuyaux, 1996). D'où la nécessité d'un ajout (filler) pour combler une partie des vides de sable, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels (Sablocrete, 1994).

II.4.1. Ciments

Le ciment habituellement utilisé pour la confection des bétons de sables doit être conforme à la norme NF P15-301. Les dosages en ciment sont proches des bétons ordinaires (300 à 400kg/m³) (Benaïssa et al., 1992). Il est à noter que pour un même usage, le dosage en ciment pour les bétons de sable est généralement plus élevé que les bétons classiques.

II.4.2. Les Granulats

Les granulats constituent la phase dominante du béton, dont ils occupent environ 70% du volume. Ils forment l'ossature du matériau. La section et le dosage des différentes fractions granulaires sont un aspect essentiel pour l'obtention d'un béton satisfaisant. Par convention, les

finies désignent les particules de taille inférieure à 80 μm (ou 75 selon la norme européenne). Les frontières entre sable et gravillon, d'une part, et entre gravillon et graviers, d'autre part, se situent respectivement vers 5/6 mm et 25/40 mm. La norme définissant les granulats est la NF P 18-540 (Arquié et Tourenq, 1990).

II.4.2.1. Les sables

Pour la réalisation d'un béton de sable, aucune condition n'est mise quant à l'origine du sable utilisé, qu'il s'agit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu de concassage ou même d'un sable de dunes. Seule leur propreté compte ; c'est-à-dire l'utilisation d'un sable non propre n'est pas toléré (Sablocrete, 1994).

II.4.3. L'eau

La propreté de l'eau faisant partie des constituants d'un béton est indispensable tout comme sa présence dans le béton. Cependant, un excès d'eau peut entraîner l'apparition de fissures suivie d'une défaillance de la résistance du béton, une diminution d'eau affecte son ouvrabilité, ce qui se traduit par une réduction de sa résistance.

La quantité d'eau dans la composition du béton est très importante pour le comportement du béton, en particulier sa résistance. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une baisse de résistance. En fait, le ciment a besoin d'environ 23% de son poids en eau afin de s'hydrater complètement. Néanmoins, Ce n'est pas la totalité du ciment qui s'hydrate, ni la teneur en eau totale utilisée pour produire et appliquer du béton dans des conditions physiquement et économiquement acceptables. Par conséquent, l'eau restante, qui peut s'évaporer, contribuera à la formation d'un réseau de pores à l'intérieur du béton, ce qui affecte non seulement sa résistance mais aussi sa durabilité (Vieira, 2015).

D'un autre côté ce n'est pas uniquement la quantité d'eau qui influe sur le mélange mais aussi la qualité de cette dernière. Où les impuretés en quantités excessives dans l'eau, peuvent affecter non seulement la durée de prise, la résistance du béton, et la stabilité du volume (changement de longueur), mais peuvent aussi causer l'efflorescence ou la corrosion des armatures. L'évaluation de l'acceptabilité de l'ensemble des impuretés qui peuvent être nocifs pour le béton ou l'acier, doit tenir compte aussi des sels, ou d'autres substances nocives émanant des agrégats ou des adjuvants qui seront additionnés à la quantité qui pourrait être contenue dans l'eau de gâchage (ACI, 1995). De ces faits, l'eau utilisée pour la confection du béton de sable doit être conforme à la norme XP P18-303.

II.4.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits qui, par une action chimique et/ou physique, modifient certaines propriétés du béton comme l'ouvrabilité, la vitesse de prise ou la résistance aux attaques de gel/dégel en présence d'agent de déverglaçage. Leur influence sur la composition volumique du mélange est négligeable (Kind-Barkauskas et al., 2006).

Plusieurs types d'adjuvants sont utilisés comme ajouts dans la confection des bétons à savoir : les plastifiants, les super-plastifiants, les entraîneurs d'air, les accélérateurs de prise, les retardateurs de prise, etc. Ces derniers contribuent à l'amélioration de certaines caractéristiques entre autre la maniabilité, l'utilisation du béton dans les conditions difficiles et ils permettent aussi l'utilisation d'autres types de matériaux dans le béton (Neville, 2000).

La norme NF EN 934-2+A1, définit l'adjuvant comme étant un produit incorporé au moment du malaxage du béton ou du mortier à une dose inférieure ou égale à 5% en masse de la teneur en ciment de ces derniers.

II.4.4.1. Rôle des adjuvants

L'utilisation d'un adjuvant dans les bétons, les mortiers ou les coulis peut causer une modification positive ou négative de certaines caractéristiques de ces derniers. Cependant, chaque adjuvant possède des caractéristiques qui lui sont propre, grâce auxquelles il contribue d'une manière ou d'une autre à la modification des propriétés des bétons à l'état frais ou durci. L'influence et l'efficacité d'un adjuvant est à la fois en fonction de son dosage et des constituants du béton. Quant au choix du type d'adjuvant (Tableau II.1), il dépend de la propriété recherchée pour le béton.

Tableau II.1 : Propriétés des adjuvants (CIM béton, 2005).

Choix du type d'adjuvant en fonction de sa propriété							
PROPRIÉTÉ	ADJUVANTS						
	Réducteurs d'eau	Plastifiants	Superplastifiants	Accélérateurs de durcissement	Accélérateurs de prise	Retardateurs de prise	Entraîneurs d'air Hydrofuges de masses
Ouvrabilité	+	+				+	
Temps de prise				-	+		
Résistances	court terme (3 jours)	+	+	+	+	-	-
	long terme (> 28 jours)	+	+		=	+	-
Air occlus							+
Résistance au gel du béton durci	+						+
Compacité	+	+	+				
État de surface		+					+
Perméabilité sous pression hydraulique			-				-

Les particules de ciment, dans une solution d'eau, ont tendance à s'agglomérer en raison de leur taille et de leur charge électrique de surface, présentant un effet négatif sur la fluidité du mélange. En tant que tel, il sera nécessaire d'augmenter la teneur en eau, à savoir le rapport E/C, pour obtenir un mélange plus fluide. Lorsque les réducteurs d'eau sont introduits dans le mélange, étant donné que ce sont des polymères avec des parties de leurs chaînes chargées de signal opposée à celui des particules de ciment, ils ont tendance à être immédiatement absorbée par la surface du ciment.

Le processus de dispersion de particules se déroule généralement selon deux mécanismes, qui peuvent se produire simultanément ou non, en fonction du type de polymère : la répulsion électrostatique et la répulsion stérique (Figure II.1) (Vieira, 2015).

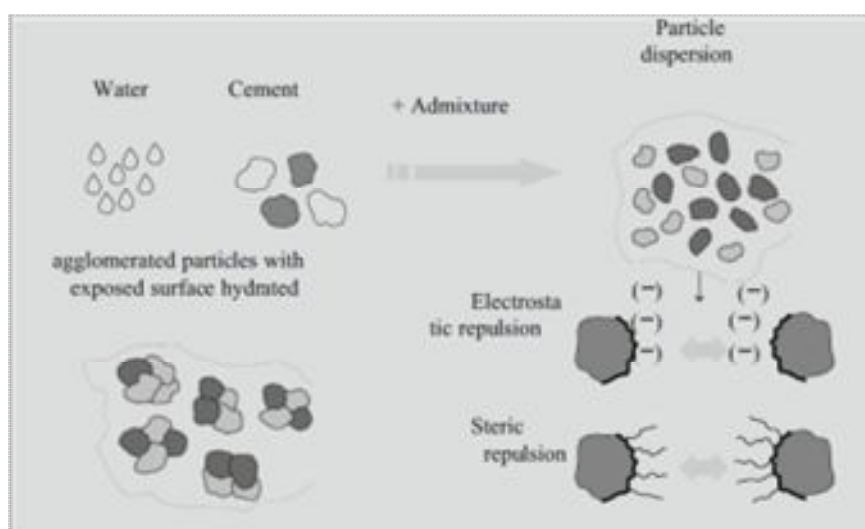


Figure II.1 : Schéma montrant l'influence et les mécanismes de dispersion des particules par l'adjuvant (Vieira, 2015).

II.4.5. Les ajouts

II.4.5. 1. Les fillers

Ce sont des farines de roche (calcaire ou siliceuse) obtenues par broyage. Les roches dures, comme le quartz, ont tendance à produire des particules plus anguleuses, dont la demande en eau est supérieure à celle des fillers calcaires, d'usage plus courant dans les bétons. Même si le rôle principal des fillers est celui de charges minérales, ils présentent cependant une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de site de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker, qu'ils accélèrent. Cet effet n'est cependant notable qu'au jeune âge. À long terme, les fillers silicieux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant (de Larrard, 2002).

On trouve les fillers ou fines sous diverses formes minérales, artificielles ou naturelles. Ils sont destinés pour le remplissage des vides des sables, dans le but d'augmenter la compacité par création d'une étendue granulaire continue (Benaïssa et al., 1992). De ces faits, les fillers peuvent agir favorablement sur les caractéristiques mécaniques des bétons et des mortiers, ce qui a été confirmé par Bosiljkov (2003) et Felekoglu (2007), et aussi économiquement par la substitution partielle du ciment par l'ajout de certains fillers, qui s'avère influé positivement sur le coût du béton.

II.4.5.2. Les fibres

Le béton durci, souffre d'une dissymétrie de comportement entre la compression et la traction, à laquelle il résiste 10 à 15 fois moins bien. Pour corriger ce défaut, une idée naturelle consiste à noyer dans le matériau frais des inclusions linéaires fibreuses (de Larrard, 2002).

Généralement, le contenu en fibres est exprimé en pour cent (%) par rapport au volume du béton. Leur quantité incorporée dans le béton dépend de la composition et la maniabilité du béton à l'état frais et des propriétés des fibres à savoir la nature, les caractéristiques géométriques, la densité, etc. En pratique le taux de fibres utilisé varie de 0,5 à 3% pour les fibres en acier et peut être plus ou moins important pour d'autres types de fibres, comme les fibres de verre, dont le taux d'incorporation peut aller au-delà de 6% et les fibres à base de polymères qui sont le plus souvent appliquées avec une teneur de 0,1 à 1% en volume de fibres (Müller et Haist, 2009).

II.5. Formulation du béton de sable

La formulation d'un béton consiste à choisir les constituants ainsi que leurs proportions, en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques souhaités. Dans le cas des bétons ordinaires, le jeu de constituants se réduit au minimum à un gravillon, un sable, un ciment et de l'eau.

Aujourd'hui, la gamme de constituants disponibles pour la formulation des bétons s'est élargie avec la diversification des adjuvants et des ajouts. Les méthodes de formulation traditionnelles présentent alors des limitations évidentes (de Larrard, 1993).

Les bétons de sable font partie des nouveaux bétons aux propriétés spécifiques intéressantes (finesse granulométrique, ouvrabilité,...), pour lesquels la démarche de formulation demeure très empirique. Différentes approches ont déjà été envisagées pour appréhender les caractéristiques de résistance des bétons de sable. Par contre, la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation demeure complexe. En effet, la pâte de ses bétons contient

toujours, en supplément du ciment et de l'eau, un ou des fillers calcaires et un adjuvant rhéologique, de façon à limiter le dosage global en ciment au même ordre de grandeur que celui utilisé dans les bétons ordinaires (Chanvillard et Basuyaux, 1996).

II.5.1. Principe de formulation

Le béton de sable, à la différence des mortiers, utilise un dosage en ciment proche du béton ordinaire (300 à 400 kg/m³). Ce qui distingue le béton de sable des bétons ordinaires, réside essentiellement en l'emploi de granulats de faible diamètre ($D \leq 5$ mm); une adjonction de granulats est cependant possible mais dans un rapport massique G/S inférieur à 1. Les dosages en ciment ont été possibles grâce au remplissage des vides du sable par un filler calcaire (0/80 μ m); ceci a pour conséquence favorable d'augmenter la compacité par création d'une étendue granulaire continue. Les fillers utilisés, en général, sont de nature calcaire grâce à leurs grandes réactivités avec les hydrates. La grande fraction des particules fines nécessite un mouillage important d'où l'utilité d'un réducteur d'eau, dans le but d'augmenter les performances et d'atténuer les déformations différées (Benaïssa et al., 1992).

II.6. Bétons de fibres métalliques

II.6.1. Fibres

II.6.1.1. Rôle des fibres

L'incorporation des fibres dans les bétons participe à la fois à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques. Cependant, le vrai rôle des fibres est qu'elles agissent sur la matrice cimentaire de deux manières, la première consiste à la limitation et au contrôle des fissures, en essayant de stopper leur influence, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance, et la deuxième c'est la transformation du matériau d'un comportement fragile à un comportement ductile se traduisant par un retard dans l'apparition des fissures.

Dans le même contexte, Mihashi et al. (2004) évoquent que le rôle des fibres dans les composites à base de ciment est de compenser en partie la faible capacité de déformation des matériaux à base de ciment. Tandis que les fibres courtes améliorent le comportement mécanique post-pic, elles sont introduites principalement pour arrêter la propagation des fissures.

Selon Zollo (1997), une meilleure efficacité des fibres est liée à la liaison ou l'ancrage et le potentiel d'absorption d'énergie grâce à l'effet cumulé du nombre de fibres, leur surface spécifique et leur orientation à l'intérieur de la matrice.

Plusieurs chercheurs soutiennent l'idée que les fibres ont une influence sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons par le biais de nombreux paramètres parmi lesquelles on

trouve : la forme et l'état de surface des fibres, la longueur (l_f) et le diamètre (d_f), l'élançement ou le rapport l_f/d_f , la nature des fibres, la rigidité des fibres, le taux de fibres incorporées et la distribution et l'orientation des fibres au sein de la matrice.

Au fait, divers fibres pouvant servir comme renfort dans les bétons, cependant, leur influence n'est pas la même. Ce qui nous laisse penser, que les fibres doivent être utilisées selon les propriétés recherchées des bétons.

II.6.1.2. Action des fibres métalliques dans la matrice cimentaire

Selon Rossi et al. (1987), l'addition des fibres d'acier dans le béton est destinée à la fois d'améliorer la ductilité du matériau et celle de la structure à laquelle il est utilisé.

En intégrant des fibres ayant une haute résistance à la traction dans la matrice, la fissuration du béton peut être inhibée ou réduite. Dans l'état fissuré, les fibres incorporées dans le béton établissent un pontage des deux bords de la fissure (Figure II.2). En revanche, le béton classique ne peut pas transférer des contraintes de traction sur une fissure dans le cas de l'ouverture des fissures de 0,15 mm ou plus (Müller et Haist, 2009).

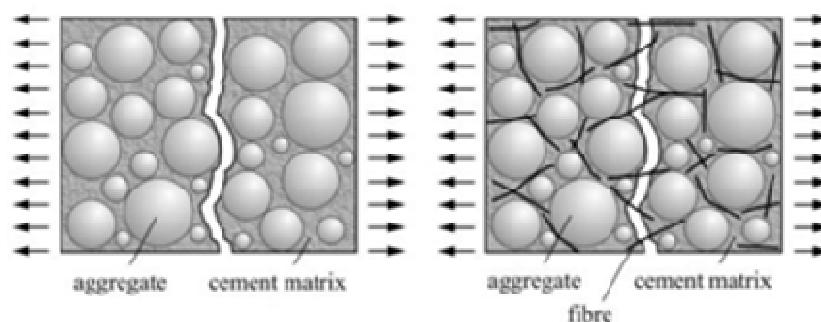


Figure II.2 : Béton avec et sans fibres à l'état fracturé (Müller et Haist, 2009).

II.6.1.3. Impact des fibres métalliques sur le béton frais

La maniabilité du béton est influencée par différents facteurs intrinsèques provenant non seulement de sa composition, mais aussi des conditions de bétonnage. Elle peut être également affectée par la présence des fibres métalliques au sein du béton.

En effet, l'addition de fibres d'acier peut réduire l'affaissement mesurée du composite par rapport à un mélange non fibreux qui peut aller de 25 à 102 mm. Dès lors, le compactage par vibration mécanique est recommandé dans la plupart des applications des bétons renforcés de fibres métalliques (ACI, 2002).

Cependant, des études ont établi que le mélange avec un affaissement relativement faible peut avoir de bonnes propriétés de consolidation sous vibrations (Balaguru et Ramakrishnan, 1987). Une autre étude montre aussi que les caractéristiques de perte d'affaissement pour le béton renforcé de fibres métalliques et le béton non renforcé sont similaires avec le temps (Balaguru et Ramakrishnan, 1988). En plus des considérations ci-dessus, l'agglomération de fibres doit être évitée (ACI, 2002).

II.6.2. Composition des bétons de fibres métalliques

Les bétons de fibres métalliques sont souvent des bétons courants, plus riches en sable, dosé entre 300 à 400 kg/m³ de ciment. Le dosage en fibres de ces bétons dépend des résistances recherchées (Chaalal, 1995).

En effet, plus le rapport des agrégats grossiers est faible, davantage de fibres peuvent être intégrées sans s'agglomérer : plus les fibres sont épaisses plus elles auront l'avantage lors de l'utilisation des agrégats grossiers. Pour assurer une maniabilité suffisante du béton renforcé de fibres, le diamètre maximal des agrégats est souvent limité à 8 mm ou moins (Müller et Haist, 2009). Ceci dit que l'efficacité des fibres comme renfort dans les bétons de sable sera d'autant plus intéressante comparativement aux bétons classiques renforcés de fibres composés de gros granulats.

II.6.3. Formulation des bétons de fibres métalliques

Formuler un béton de fibres métalliques (BFM) revient à l'optimisation de sa composition. Cela consiste à optimiser le squelette granulaire de ce dernier en fonction de la maniabilité souhaitée.

D'après la littérature, les méthodes de compositions des BFM sont dans leurs majorités empiriques, basées essentiellement sur un grand nombre d'études expérimentales et aboutissent à des recommandations qui sont bien utiles mais insuffisantes, du fait que suivant l'utilisation envisagée, la composition des BFM doit être à chaque fois spécifique, ce qui répond aux objectifs visés (Rossi et al., 1989a).

Parmi ces méthodes empiriques utilisées nous citons :

Moens (1976), qui a limité le paramètre ($V_f \cdot l/d$) pour un coefficient qui prend d'avantage en compte l'aspect dimensionnel des granulats :

$$V_f \cdot l/d < C_m \dots\dots\dots(II.1)$$

$$\text{Avec } C_m = \sum V_{ij} \cdot Cd_{ij} \dots\dots\dots(II.2)$$

Où :

V_f : Pourcentage volumique des fibres; l/d : Elancement (longueur/diamètre); V_{ij} : Volume d'une fraction de granulats de diamètre compris entre d_i et d_j ; Cd_{ij} : Coefficient d'interaction de la fraction d_{ij} de granulats tel que :

$$Cd_{ij} = 1,72. \ln (d_i d_j) \dots \dots \dots (II.3)$$

Dehousse et al. (1974), ont fixé le rapport $G/ (G+S)$ à 0,50 afin de limiter la tendance au micro bétons. Une autre méthode expérimentale de formulation développée il y a quelques dizaines d'années, est la méthode de Baron-Lesage ; cette dernière a été largement utilisée dans l'optimisation du squelette granulaire des bétons courants et adaptée aux bétons de fibres métalliques par Rossi (1998). Cette méthode est basée sur deux hypothèses principales largement vérifiées par l'expérience :

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

L'application de cette méthode à la composition des bétons de fibres métalliques à nécessitée une troisième hypothèse.

- 3- L'introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

En pratique, la composition des BFM est réalisée suivant trois étapes :

- a- Le rapport E/C et le pourcentage de fibres sont fixés au départ.
- b- Variation du rapport S/G et la détermination de la maniabilité pour chaque valeur du rapport, qui permet de tracer la courbe (maniabilité-rapport S/G), afin de déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est la plus grande (Figure II.3).
- c- Sur la base de l'hypothèse n°2, la quantité d'eau et de ciment sont ajustée, mais le rapport E/C restant constant pour obtenir la maniabilité souhaitée. L'ajout d'un superplastifiant peut être aussi une solution pour régler la maniabilité.

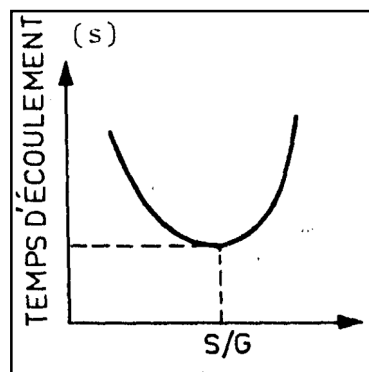


Figure II.3 : Détermination du rapport S/G optimal (Rossi et al., 1989a).

II.6.3.1.2. Influence du dosage en fibres

Au point où en est actuellement, toutes les études montrent l'évidence d'une diminution très remarquable de la maniabilité, lorsque le pourcentage de fibres incorporées dans un mélange augmente.

Dans le même ordre d'idée, Mohod (2012) indique à travers son étude que le taux de fibres utilisé dans la réalisation de béton de fibres d'acier doit être compris entre 0,5 et 1,5%, et que l'addition de ces dernières peut réduire la maniabilité du mélange et provoquer leur agglomération qui sera extrêmement difficile à séparer par vibration. Egalement d'après l'étude faite par Edgington et al. (1974) ; affirmant que l'incorporation d'un pourcentage de fibres d'acier dépassant 2%, présente un préjudice pour la maniabilité du mélange.

D'autres études ont été faites dans le cadre de la limitation du pourcentage de fibres incorporées dans les bétons, dont on peut citer la formule empirique établie par Lim et al. (1987).

$$V_f < 1,08 \left(\frac{B}{(l_f/d_f)} - 16 \right) (1 - (D_{max}/32,5)) \dots \dots \dots (II. 5)$$

D'où:

V_f : pourcentage volumique des fibres ; l_f et d_f : sont respectivement la longueur et le diamètre des fibres ; B : constante dépendant des proportions de mélange de béton (valeur constante 1,8);
 D_{max} : taille du plus gros granulat en mm.

Dans le même cadre aussi, on trouve une règle qui est souvent utilisée comme une limite pratique pour les pourcentages de fibres incorporées dans les bétons (Venuat, 1983).

$$V_f \frac{l_f}{d_f} < 3 \dots \dots \dots (II. 6)$$

V_f : Pourcentage volumique des fibres ;
 l_f et d_f : Sont respectivement la longueur et le diamètre des fibres.

II.6.3.1.3. Influence de la granulométrie du mélange

La composition granulaire d'un mélange joue un rôle essentiel dans la maniabilité des bétons renforcés de fibres; l'ensemble des chercheurs travaillant sur les bétons fibrés s'accordent à ce que la maniabilité décroît avec l'augmentation du taux de fibres incorporées au sein d'une matrice d'une façon unanime. Sans autant oublier aussi l'influence des dimensions des granulats sur le mélange, delà Absi (1994), a constaté que les fibres s'arrangent d'une manière préférable avec les bétons ayant une granulométrie fines de l'ordre de ($L_f > 4D_{max}$).

II.6.4. Fonctionnement et mécanisme de rupture des bétons de fibres

II.6.4.1. Fonctionnement mécanique des fibres métalliques dans les bétons

L'association des fibres métalliques avec les bétons a pour rôle de reprendre les efforts au travers des macro-fissures. Pour les bétons de fibres métalliques nous pouvons utiliser des microfibrilles (longueur inférieure à 5 mm) (Rossi et al., 1995a), afin d'améliorer la capacité portante et la ductilité des structures. Mais par contre, elles ne permettent pas l'amélioration de la résistance intrinsèque du matériau.

Il existe deux grandes familles de fibres métalliques, se distinguant par leur fonctionnement mécanique (Rossi et al, 1995b) :

- Les fibres fonctionnant par adhérence : de forme aplatie pour avoir une surface spécifique importante, mais peu ductiles. Leur intérêt étant de limiter par frottement les ouvertures de fissures ;
- Les fibres fonctionnant par ancrage : de forme cylindrique. En acier tréfilé, ayant un comportement ductile, l'ancrage pouvant être amélioré, par des crochets ajoutés aux extrémités de la fibre ou des ondulations disposées tout le long de la fibre.

II.6.4.2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres

On peut observer sur la figure II.4 que le procédé de fissuration dans le béton peut être divisé en trois phases. La première étape concerne la microfissuration de l'ensemble du volume du béton, la seconde étape dans laquelle les microfissures tendent à se concentrer en suivant la direction des contraintes principales. D'un point de vue mécanique, cette phase correspond à la concentration de contrainte conduisant à la formation d'une ou de plusieurs macro-fissures. La troisième phase, correspond à la propagation des macro-fissures le long de la direction de la contrainte de traction principale (Rossi et al., 1987), conduisant ainsi à la ruine.

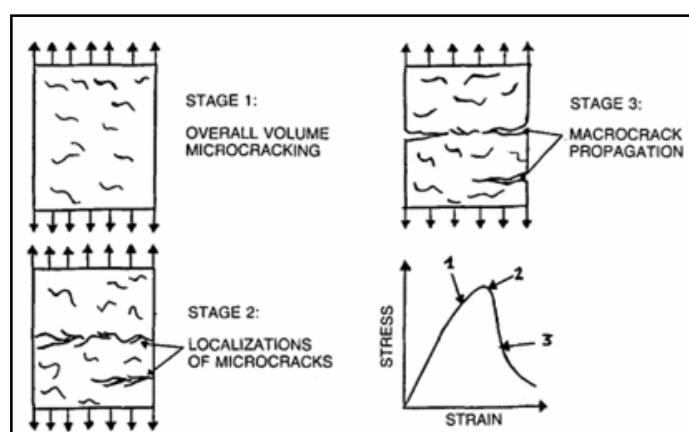


Figure II.4 : Processus de fissuration dans le béton ordinaire (Rossi et al., 1987).

Durant ces étapes les fibres métalliques peuvent intervenir sur l'évolution de la fissuration de la manière suivante :

- Durant la phase de microfissuration diffuse, les fibres métalliques, notamment les fibres courtes peuvent couvrir les microfissures et retarder l'apparition de la localisation. On observe, alors, une augmentation de la résistance et de la ductilité à l'échelle du matériau (en tant que propriété intrinsèque) ;
- Durant la phase de propagation de macro-fissure, les fibres métalliques peuvent également couvrir ces macro-fissures en retardant le phénomène de propagation des fissures. Après l'opération de l'ouverture des fissures, les fibres métalliques auront pour fonction la reprise des efforts, assurant ainsi une capacité portante et une ductilité plus grande à la structure considérée.

Il est bien évident que, dans la plupart des cas, la géométrie optimale de la fibre métallique qu'il faut utiliser pour agir sur la micro ou sur la macro fissuration active sera différente. En effet, dans le cas où les fibres doivent agir sur les microfissures, il est nécessaire que les fibres soient nombreuses et de petit diamètre. Pour des raisons de maniabilité du matériau, fortement liée au rapport longueur/diamètre de la fibre, les fibres devront être également courtes (Rossi, 1998). Dans le cas où les fibres agissent sur les macro-fissures, la longueur de la fibre doit être suffisamment grande pour assurer un ancrage correct de celle-ci dans la matrice et un pontage des macro-fissures, jouant un rôle similaire aux armatures dans le béton armé, même si le mécanisme d'ancrage est différent. Pour des raisons de maniabilité, les fibres longues ne pourront s'utiliser qu'en pourcentage beaucoup plus faible que les fibres courtes (Chauvin et Grimaldi, 1988). Ce fonctionnement est résumé sur la figure II.5 (Yun et al., 2007).

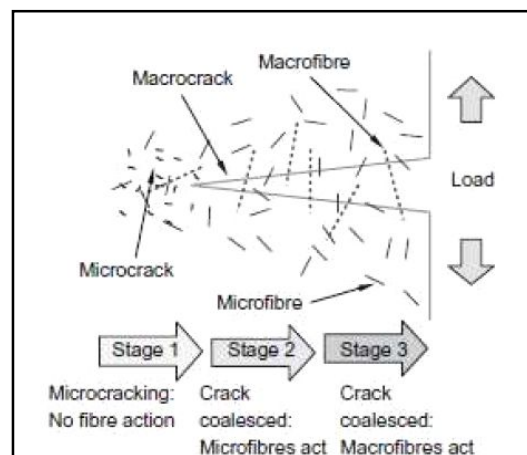


Figure II.5 : Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration au sein de la matrice (Yun et al., 2007).

II.6.5. Propriétés des bétons de fibres métalliques

Si on se réfère à la littérature portant sur le comportement mécanique des bétons de fibres métalliques, nous remarquons que beaucoup d'informations et de résultats qui sont obtenus par divers chercheurs, sont d'une manière générale incohérente ; c'est-à-dire les résultats présentés

sont souvent différents, cela est dû à la variation de la composition (E/C, G/S, type de malaxage), aux différentes natures et forme des fibres. De ce fait, nous allons présenter quelques exemples d'études cités parmi tant d'autres dans la littérature scientifique, et nous allons essayer d'en tirer un enseignement concernant les contraintes à la rupture en flexion et en compression des bétons de fibres métalliques.

II.6.5.1. Comportement en compression du béton de fibres métalliques

La résistance à la compression du béton de fibres métalliques est inférieure à celle d'un béton non fibré (Rossi et al., 1989b). Par ailleurs, Swamy et Managat (1974) ont montré, suite à une étude comparative entre le béton sans fibre et le béton de fibres métalliques, qu'une légère augmentation de l'effort maximum de compression en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre est observée.

Dans le même ordre d'idées, Murali et al. (2014), confirment que l'ajout de fibres d'acier au béton peut améliorer de manière significative la résistance à la compression comparativement au béton témoin. Pour ces derniers, la fraction volumique optimale des fibres pour obtenir une résistance élevée est de 1,5%, afin de s'assurer qu'aucunes boules de fibres ne se forment qui aurait une incidence sur la consistance du béton.

En général, la résistance à la compression du béton renforcé par des fibres présente une légère augmentation en conformité avec le taux de fibres (Figure II.6, à gauche) en raison de la microfissuration obstruée. Ce qui est plus important cependant, est l'augmentation de la déformation à la rupture et, en particulier, l'augmentation de la capacité d'énergie qui résulte du fait que la branche descendante de la courbe contrainte-déformation devient de plus en plus horizontale avec l'augmentation du dosage en fibres. Cependant, une augmentation du rapport l/d de la fibre peut également se traduire par une capacité d'énergie plus élevée (figure II.6 à droite) (Müller et Haist, 2009).

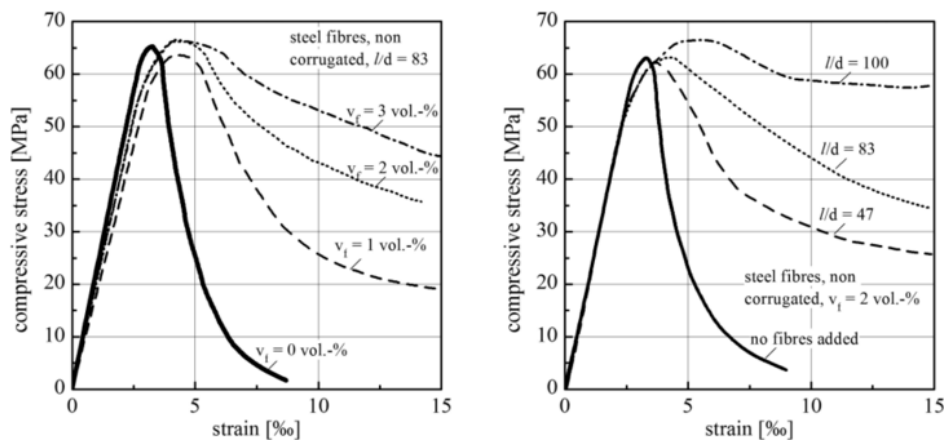


Figure II.6 : Diagramme contrainte-déformation du béton renforcé avec différents pourcentages (à gauche) et rapports l/d de fibres (à droite) sous une charge de compression (ACI, 1988).

Également la figure II.7 montre que l'amélioration de la résistance à la compression du béton de fibre est liée au dosage en fibres, plus le taux de fibres est élevé plus la résistance à la compression augmente. Cependant, ces résultats sont enregistrés au-delà de quatre jours, puisque à cette date la résistance est semblable à celui d'un béton ordinaire. L'augmentation de la résistance à la compression du béton renforcé par des fibres au moment ultérieur est due à l'hydratation continue du ciment et à l'augmentation progressive de la force de liaison entre la matrice et les fibres (Chern et Young, 1989).

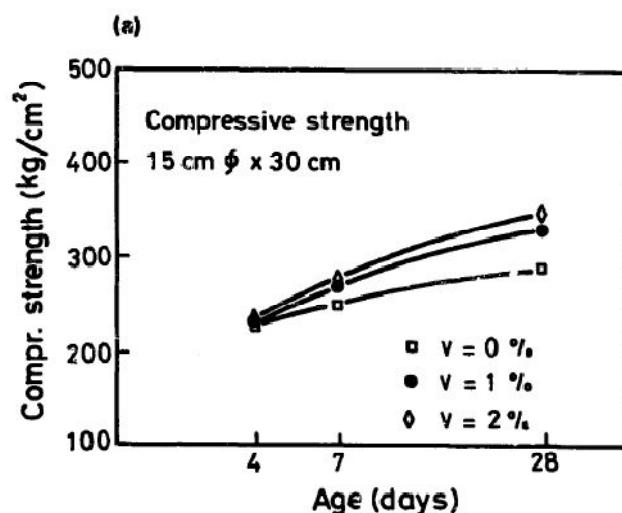


Figure II.7 : Résistance à la compression du béton à différents âges (Chern et Young, 1989).

II.6.5.2. Comportement en traction du béton de fibres métalliques

L'une des anomalies majeures du béton, c'est bien sa faible résistance à la traction. De ce fait, l'incorporation des fibres métalliques, s'inscrit dans le but d'une amélioration du comportement en traction du béton par une couture de la macro-fissuration.

Nombreux sont ceux qui ont souligné que le comportement en traction uni-axiale des bétons de fibres métalliques et des bétons non fibrés avant l'apparition de la première fissure est presque le même, à part peut-être une augmentation ou une diminution insignifiante, selon les cas. Mais il faut signaler que la plupart des chercheurs utilisent des essais de traction indirecte (essai de traction par flexion ou par fendage).

La mesure dans laquelle la résistance à la traction uni-axiale et la résistance à la traction par flexion peut être augmentée par un renfort fibreux, dépend principalement de savoir si la teneur en fibres est supérieure à la valeur critique de l'ajout de fibres qui est approximativement de l'ordre de 2 à 3% en volume (Figure II.8) (ACI, 1988). En quelque sorte si le pourcentage en fibre dépasse un certain seuil décrit ici par 3%, des problèmes d'ouvrabilité vont surgir agissant négativement la résistance du béton.

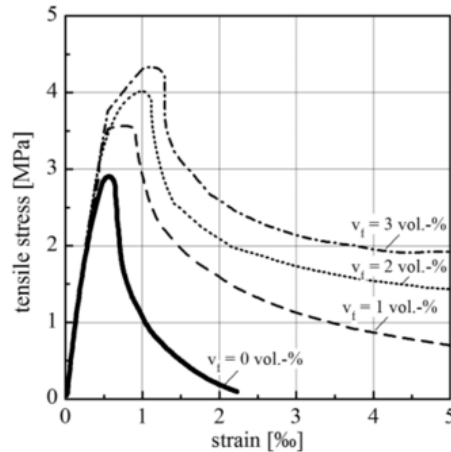


Figure II.8 : Contrainte-déformation du béton renforcé de différents pourcentages de fibres sous une charge de traction (ACI, 1988).

II.6.5.3. Comportement en flexion du béton de fibres métalliques

D'une manière générale l'introduction de fibres métalliques dans la matrice du béton, s'oppose aux contraintes de traction ainsi qu'à la propagation rapide des fissures en améliorant ainsi la ductilité du béton. De ce fait, plusieurs études ont été effectuées, montrant l'effet positif que peuvent jouer les fibres métalliques dans l'amélioration des caractéristiques du béton, dont on peut citer plusieurs travaux comme celle de Swamy et Managat, (1974), qui ont trouvé que la résistance à la flexion augmente généralement avec le rapport l_f/d_f jusqu'à ce que des difficultés de mélange de fibres longues et minces soient rencontrées et l'enchevêtrement de fibres se produit. Ait-Tahar (2000), conclut d'après des résultats trouvés expérimentalement que la résistance à la traction par flexion augmente avec le pourcentage des fibres incorporées dans la matrice du béton.

Absi (1994), reporte qu'une amélioration très significative de la portance du matériau dans la phase plastique, après la première fissuration est obtenue. Ce dernier auteur, indique que la résistance en flexion du béton de fibres partiellement orientées dans le plan de la fissure présente une nette amélioration de la résistance en flexion du béton renforcé de fibres métalliques par rapport au béton non fibré (témoin); ces résultats présentent un avantage quant à l'efficacité des fibres dans l'amélioration de la portance des matériaux, la diminution de fragilité et l'amélioration de la ductilité du béton.

Ait-Tahar (2001), après des essais effectués, a conclu que :

- l'ajout des fibres d'acier dans la matrice permet une augmentation de l'effort engendrant la première fissure de 12,5 à 50%, et la fissuration en masse de 12,5%.
- Le moment de fissuration est augmenté de 20%.

- Les valeurs de la résistance à la traction par flexion et du module de déformation longitudinal du béton de fibres augmentent d'une manière très satisfaisante.
- Grande résistance à la première fissure, la propagation des fissures est retardée, le comportement est plus ductile et le moment de rupture est amélioré par rapport au béton ordinaire.

II.6.5.4. Comportement sous sollicitations impulsionnelles (chocs)

Selon la littérature, il est souvent signalé que le comportement des BFM sous sollicitations impulsionnelles (chocs), se comporte d'une manière satisfaisante.

Selon Rossi (1998), une nette augmentation de l'énergie dissipée et de l'effort maximal atteint sur une éprouvette ou sur un élément de structure est observée, quand on utilise un béton fibré au lieu d'un béton non fibré.

Selon Absi (1994), l'étude du comportement des nœuds de liaison poteaux-poutres en béton armé, montre que l'introduction des fibres au sein du béton améliore sensiblement le comportement de l'ensemble, sous l'action des cycles de déformation de grandes amplitudes (cas de séisme).

Par ailleurs, des essais pour la caractérisation de la résistance aux chocs des poutres de béton armé avec addition de fibres, ont montré que : le comportement ductile du béton de fibres sous l'impact direct d'un objet en chute libre, permet au matériau de rester en place sans dégradation importante alors que le béton non fibré présente sous les mêmes conditions des éclatements (Absi, 1994).

Mindess (1993) et Gambardua (1994) in Casanova (1996), suggèrent que cette augmentation reflète un mécanisme de structure couplé à une augmentation de l'énergie dissipée lors de l'arrachement dynamique d'une fibre.

II.6.5.4.1. Influence de l'orientation des fibres

La contribution des fibres dans l'amélioration des propriétés des bétons dépend d'une manière importante de l'orientation de ces dernières au sein de la matrice ; cette orientation est influencée principalement par la technique de mise en œuvre et les effets liés à l'écoulement des fibres. Ainsi, dans une structure et sous l'effet de chargement en traction les fissures apparaissent généralement perpendiculaires à la charge. De ce fait, suivant l'orientation préférentielle des fibres par rapport aux fissures, nous distinguons (Rossi, 1998):

- Les fibres orientées perpendiculairement aux fissures, c'est la position idéale où les fibres fonctionnent d'une manière très efficace ;

- Les fibres orientées parallèlement aux fissures ; dans cette position les fibres ne sont pas efficaces.

Bonzel et Shmidt (1986) in Debicki (1988), ont étudié l'influence de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques de bétons de fibres. Ils concluent que :

- Le degré d'orientation des fibres dépend principalement de la quantité de ciment, de la proportion de mortier dans le béton, de la taille des plus gros granulats, du pourcentage de fibres d'acier, de l'ouvrabilité du béton et de la longueur du déplacement de la matière durant le compactage ;
- Les caractéristiques du béton durci peuvent être substantiellement améliorées par l'ajout de fibres seulement si les fibres étaient orientées dans des plans perpendiculaires à la direction de contrainte en compression, ou orientées parallèlement à la direction de contrainte en traction.
- Dans le cas de fibres favorablement orientées par rapport à la charge, les résistances en compression peuvent être augmentées de 15% et les résistances en flexion de plus de 90%. Avec des fibres orientées défavorablement les résultats ne sont pas supérieurs à ceux du béton sans fibres.

Dans le même concept Rossi (1992), affirme que lorsque les fibres de fer amorphes sont défavorablement orientées (Figure II.9) par rapport à la direction de chargement, il est constaté que, quelle que soit leur longueur, leur action est insuffisante. Il semblerait aussi que le pourcentage de fibres n'a guère d'influence. Par contre avec une orientation préférentielle (Figure II.10) plus particulièrement pour les fibres 30 et 60 mm, l'influence du pourcentage de fibres est important.

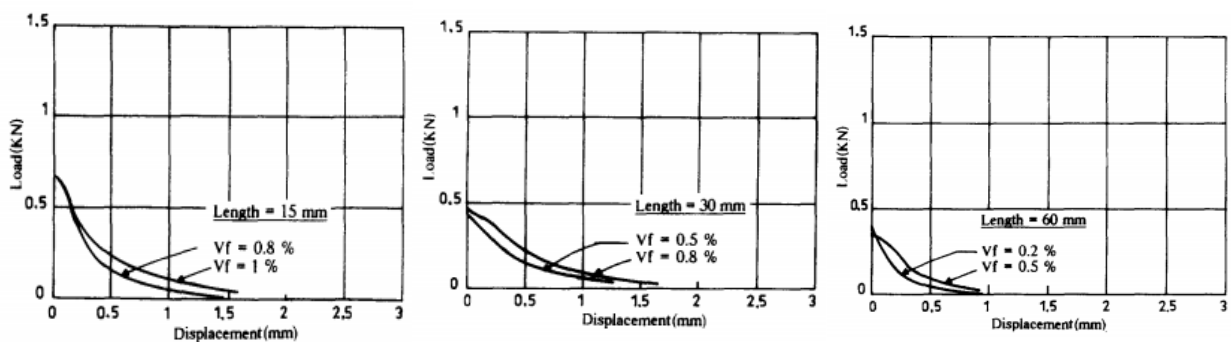


Figure II.9 : Influence du pourcentage de fibres sur la force en fonction de la largeur d'ouverture de fissure: cas des fibres de fer amorphes dans une orientation défavorable (Rossi, 1992).

En fonction de la situation de contrainte-déformation dans une structure, la déformation causée par le retrait et le fluage peut s'additionner ou bien le fluage peut conduire à une relaxation, comme il peut réduire la contrainte causée par le retrait. Cette interaction entre la contrainte et la déformation est d'une importance vitale pour les structures en béton, car elle influence la fissuration, la déviation et la perte de précontrainte. En conséquence, le fluage et le retrait ont été pris en compte par de nombreuses normes, et ils représentent un axe de recherche privilégié (Leemann et Lura, 2014).

Comme le retrait est un effet à long terme, les contraintes induites par ce phénomène sont soulagées par le fluage. Si le renforcement n'est pas symétriquement placé sur une section, le retrait provoque une contrainte non uniforme et une distribution de déformation dans la hauteur de la section. Les contraintes maximales de traction apparaissent sur les fibres extrêmes du béton, à proximité de la plus grande concentration de renforcement (Kaklauskas et al., 2009).

II.6.5.5.1. Le retrait

D'une manière générale, le retrait (avant ou après prise finale) des bétons renforcés de fibres est moins important que celui des bétons sans fibres. A cet effet, nombreux sont les chercheurs qui ont montré l'influence positive des fibres sur le phénomène de retrait.

Dans le même ordre d'idées Alekrish et Alsayed (1994), rapportent que les études réalisées au cours des deux dernières décennies sur le retrait et les mesures de ce dernier pour les bétons fibreux ont montré que l'incorporation de fibres dans les mélanges de béton réduit le retrait de séchage. Selon Sounthararajan et Sivakumar (2013), l'addition de fibres d'acier dans le béton a entraînée la réduction du retrait de séchage par rapport au ciment Portland ordinaire, et avec l'accroissement du pourcentage de fibres d'acier, une augmentation du pourcentage de la réduction du retrait de séchage a été remarquée. Aussi Ahmad et al. (2010), ont conclu que la teneur en fibres a une influence directe sur la retenue du retrait de séchage du béton, ainsi que sur le contrôle de la fissuration.

Pour Managat et Azzari (1988), une réduction du retrait de 35% a été obtenue avec 3% de fibres d'aciers de 22,5 mm de longueur sur un béton de composition (C = 1; S = 2,50 ; G = 1,20 ; E = 0,58).

Ces chercheurs ont proposé un modèle théorique pour la déformation due au retrait :

$$\varepsilon_{bf} = \varepsilon_{bc} (1 - 2,45 \mu V_f l/d) \dots \dots \dots (II.9)$$

Où :

ε_{bf} : Déformation de retrait du béton de fibres ;

ε_{bc} : Déformation de retrait du béton courant ;

μ : Paramètre caractérisant l'interface fibres matrice et dépendant du type de fibres et des constituant de la matrice ;

V_f , l et d : Respectivement volume de fibres, longueur et diamètre des fibres.

D'autre part Swamy et Al-Ta'an (1981), révèlent que la présence des fibres d'aciers exerce une légère influence sur le retrait libre, la réduction est de l'ordre de 20% ; par contre elle contribue d'une manière remarquable à l'amélioration de retrait empêché (le retrait du béton est empêché par les conditions aux limites) de l'ordre de 50%.

II.6.5.5.2. Fluage

La déformation dans le béton peut se produire pour des raisons différentes. Quand une contrainte est appliquée, le béton présente une déformation réversible immédiate (déformation élastique), et une déformation supplémentaire qui augmente avec le temps (fluage). Après l'élimination de la contrainte, une partie de cette déformation est récupérée immédiatement en raison des propriétés élastiques du matériau, et une partie mineure est récupéré dans le temps (fluage réversible). Une autre partie de la déformation, cependant, n'a pas été récupérée c'est se qu'on appelle le fluage irréversible (Leemann et Lura 2014).

L'avènement de l'utilisation des fibres comme renfort dans les bétons a donnée des résultats probants dans la diminution du fluage. Dans le même contexte Chern et Young (1989), ont montré que le fluage des bétons renforcés de fibres d'acier à des taux de 1% et 2%, est inférieur à celui du béton témoin (sans fibres) dans les conditions sèches et humides (Figure II.11). Ces derniers auteurs, ont conclu aussi que parfois les fibres d'acier sont plus efficaces pour retenir les déformations qui auraient survenir ultérieurement.

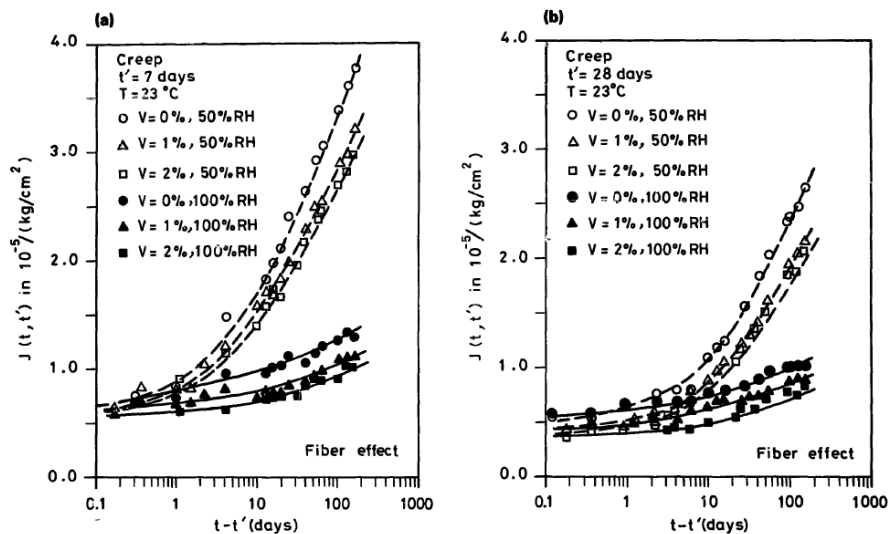


Figure II. 11 : Effet du volume des fibres sur le fluage du béton dans les conditions sèches ou humides (âge de chargement (a) $t' = 7$ j; (b) $t' = 28$ j) (Chern et Young, 1989).

II.6.5.6. Durabilité

Un béton possédant une bonne résistance mécanique n'est pas forcément durable; c'est pourquoi à côté de la consistance, de la résistance à court terme et des résistances caractéristiques à vingt-huit jours, l'adaptation du béton à son environnement contribue fortement à déterminer sa composition.

L'élément nouveau par rapport au béton courant (non fibré) influant sur la durabilité des BFM est la corrosion des fibres métalliques, pouvant présenter une menace quant à la durabilité des bétons de fibres métalliques. Des remarques et des constatations de plusieurs auteurs ont été émises suite à des applications et des essais sur les bétons de fibres métalliques :

Une méthode expérimentale a été réalisée par Dubois et Nougier (1989) in Rossi (1998) qui ont conclu qu'en dehors de quelques salissures possibles, nuisibles pour l'esthétique des structures, la corrosion de fibres non traversés de fissures n'induit aucun problème grave pour la durabilité ou la capacité portante de ces structures en béton de fibres métalliques.

Dans le même ordre d'idée, lors des travaux de surfacage d'une autoroute au Québec dans le Canada, il a été observé une absence de corrosion des fibres d'acier dans les fissures d'ouverture inférieure à 0,30 mm, après 8 ans de service malgré l'utilisation des sels de déverglaçage (Casanova, 1996). Également Rossi (1998), témoigne 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. D'une manière générale, l'utilisation de fibres diminue la fissuration, d'où une augmentation de la résistance à la corrosion, ce qui induit donc une augmentation de la durabilité.

En utilisant un abrasif Kobayashi, (1983), a remarqué que l'usure du béton de fibres métalliques est extrêmement faible comparativement au béton ordinaire. Aussi selon ce dernier auteur la résistance à la congélation et la décongélation de béton de fibres d'acier dans le cas du béton à air occlus (teneur en air de 5-6%), est nettement améliorée par rapport à un béton témoin.

II.6.5.7. Résistance au feu

La nécessité d'avoir des structures en béton possédant un bon comportement vis-à-vis des hautes températures, est de plus en plus demandée de nos jours. Ceci est dû aux nombres d'accidents survenant liés au feu, et qui entraînent souvent la ruine, causant ainsi sur le plan économique des pertes énormes. Beaucoup de travaux ont été accomplis sur l'influence de l'élévation de température sur les bétons de fibres (Casanova, 1996 ; de Rivaz, 2008 ; Müller et

Haist, 2009 ; Colombo et al., 2010 ; Petrus et al., 2014 ; Caverzan et al., 2015; Kodur et Harmathy, 2016).

D'après Casanova (1996), peu d'essais ont été réalisés concernant ces problèmes, mais les bétons de fibres métalliques pourront montrer un comportement satisfaisant par rapport à d'autres types de fibres.

Suite aux travaux de Müller et Haist (2009) et Kodur et Harmathy (2016), le béton renforcé en fibres d'acier présente une résistance légèrement plus importante à des températures élevées par rapport au béton conventionnel. Ce qui est dû au degré plus élevé de cohésion créée par les fibres d'acier (Müller et Haist, 2009).

Selon de Rivaz (2008), la combinaison de fibres métalliques et des microfibrilles de polypropylène constitue une solution adéquate pour une meilleure résistance au feu et réduit considérablement le risque d'écaillage.

En se référant à la résistance à la compression (très légèrement affectée par le mécanisme de l'arrachement), une décroissance très linéaire des propriétés mécaniques du matériau avec la température a été détectée, ce qui confirme que cet ajout de fibres ne modifie pas de manière significative la résistance au feu en compression uniaxiale (Colombo et al., 2010).

Quant aux travaux réalisés par Caverzan et al. (2015), le matériau exposé à 600°C échoue en raison d'une rupture de fibres d'acier. La décroissance significative des propriétés mécaniques des fibres peut être attribuée selon ces derniers auteurs à la modification de la microstructure de la fibre et une réduction évidente de la section transversale. De plus, les fibres exposées à 600°C semblent couvertes par un film d'oxyde, ce qui pourrait affecter la liaison entre les fibres et la matrice. Par contre, pour Petrus et al. (2014) la performance du béton renforcé de fibres est optimum à la température de 600°C, et l'effet des fibres d'acier pour la résistance à la flexion devient moins significatif à une température supérieure à 600°C. L'ajout de fibres d'acier peut augmenter la résistance à la flexion résiduelle du béton autour de 74,42% à la température de 600°C.

II.7. Conclusion

Le besoin de bétons ayant des propriétés de plus en plus performantes combinées avec une faible résistance à la traction, fait que la recherche s'est orientée vers l'utilisation des bétons renforcés de fibres en particulier métalliques afin de répondre à certaines carences en terme de retrait et de résistance, spécialement pour les bétons de sable où l'ensemble des chercheurs s'accordent à dire que ces derniers présentent un retrait élevé et une résistance inférieure par rapport au béton ordinaire, qui handicape le bon comportement du béton.

Dans ce chapitre nous avons essayé d'aborder l'essentiel des propriétés du béton avec et sans fibres, où nous pouvons retenir que les fibres métalliques incorporées dans les bétons présentent généralement un avantage incontestable dans le passage du béton d'un comportement fragile à celui d'un comportement ductile, ceci par une augmentation de la résistance à l'apparition et la propagation des fissures précoces. Quant aux propriétés mécaniques et rhéologiques, les résultats présentés indiquent qu'en général il y a une amélioration liée principalement aux caractéristiques géométriques, au dosage et à l'orientation des fibres. Cependant, un problème qui demeure continuellement sans solution c'est le manque d'une formulation universellement connu pour ce genre de bétons.

CHAPITRE III

Matériel et méthodes

Matériel et méthodes

III.1. Introduction

Un béton est un matériau composé essentiellement d'éléments naturels à savoir : le sable, le gravier, le ciment et l'eau. Cependant, si on cherche à améliorer certaines de ses caractéristiques plus particulièrement son ouvrabilité, l'ajout des adjuvants comme les plastifiants ou les superplastifiants seront d'une grande utilité, pouvant également jouer un rôle positif dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques. D'autres ajouts, s'avèrent bénéfiques pour le renforcement des bétons, comme dans le cas de cette étude où des fibres métalliques issues de pneus usés ont été utilisées dans le renforcement des bétons, d'un côté pour réduire la fissuration et accroître la résistance mécanique et d'un autre côté conférer une meilleure ductilité suivie d'une résistance à la rupture des bétons. Dans ce cas de figure, on peut parler d'un béton fibré possédant ses propres caractéristiques.

Par manque d'une formulation universelle, il fait l'objet actuellement d'un axe de recherche privilégié de par le monde afin de lui assuré une place qui lui revient de droit dans le monde de la construction, et de s'imposé comme un matériau composite à part entière.

De ce fait, nous avons essayé d'élaboré une formulation en se basant sur les dosages correspondant à un mortier normalisé. En faisant tout d'abord le choix et la caractérisation des constituants et ensuite leurs dosages. En cherchant à utiliser des matériaux locaux à des fins purement économiques et environnementales, nous nous sommes heurtés à un choix restreint dans la sélection des matériaux.

III.2. Choix des matériaux utilisés

Le choix des constituants dans ce travail n'est pas fait au hasard, ayant comme objectif la recherche d'un matériau élaboré à partir des constituants locaux et dans le souci de garantir le côté technique (caractéristiques mécaniques et rhéologiques) et économique d'une part et le respect de l'environnement d'autre part. Pour cela, nous avons opté pour l'utilisation du sable de

dunes disponible en grande quantité dans la région d'Ouargla (sud-est Algérien) et un sable alluvionnaire extrait des gisements locaux.

Quant aux fibres, nous avons opté à l'utilisation de fibres métalliques issues de pneus usés dont la source (parc roulant) ne cesse d'accroître avec à la fois le développement de l'industrie automobile et l'explosion démographique. Dans le même contexte, des statistiques ont été faites par Ernst et Young (2014) affirmant que des centaines de millions de pneus seront renouvelés et jetés dans la nature chaque année dans le monde. Pour le liant un ciment CPJ-CEMII/A32.5 a été utilisé et enfin un super plastifiant "MEDAPLAST- SP" a été introduit dans le béton comme ajout pour l'amélioration de la maniabilité.

Dans ce chapitre, nous allons présenter tout d'abords les matériaux utilisés dans la confection des bétons de sable de dunes avec et sans fibres, ensuite les méthodes appropriées utilisées dans ce travail.

III.3. Matériaux utilisés

Plusieurs matériaux de base ont été utilisés dans ce travail pour la confection des bétons: le sable, le ciment, l'eau, les fibres métalliques et l'adjuvant.

III.3.1. Sable

On entend par sable tout granulats 0/D conformes aux définitions des normes NFP 18-101 et NFP 18-301. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique (PENPC, 1994).

Dans ce travail nous avons utilisé deux types de sable à savoir : le sable de dunes provenant de la région de Sidi-khouiled située à proximité de la ville d'Ouargla et un sable alluvionnaire de Hassi Sayeh de la même région (Figure III.1)

III.3.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ CEM II /A 32.5 disponible sur le marché, fabriqué par la cimenterie de Ain-Touta (Algérie).

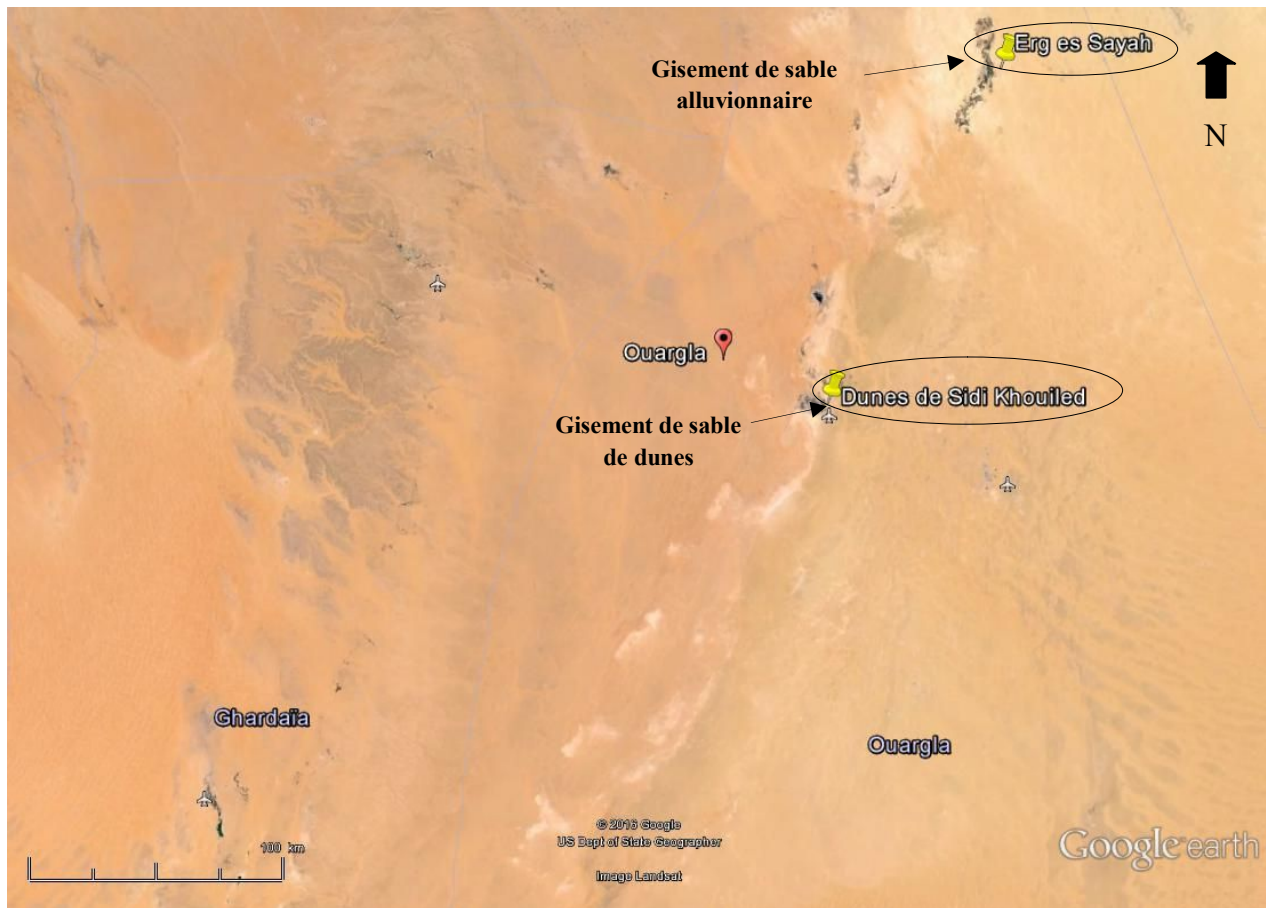


Figure III.1: Localisation des gisements de sables utilisés (Image Google earth).

III.3.2.1. Surface spécifique

Elle est mesurée par comparaison avec un ciment de référence dont la surface spécifique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment, plus la surface spécifique de cette poudre est importante plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est proportionnelle à la \sqrt{t} . L'appareil d'essai utilisé est appelé «Blaine», la surface spécifique de Blaine est donnée par la formule suivante (NFP 15-442) :

$$SSB = (K \cdot \sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}) / (\rho (1-e) \cdot \sqrt{\eta}) \dots \dots \dots (III.1)$$

t : temps de passage de l'air dans la couche de la poudre en second ;

η : viscosité de l'air à la température de l'essai en poise ;

ρ : masse volumique absolue en g /cm³;

K : constante de l'appareil ;

e : porosité.

La surface spécifique du ciment utilisé est de 3859 cm²/g.

III.3.2.2. Temps de prise

Il constitue une indication importante pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons normaux ou de fibres. Il varie en fonction de la nature du ciment (à prise lente ou rapide) ; de la finesse de mouture qui favorise l'hydratation et de la température qui influe sur la vitesse des réactions chimiques et accélère la prise. Il est généralement supérieur à 90 min pour les ciments courants à une température de 20°C.

L'essai de prise est réalisé avec l'appareil de Vicat. Le temps de prise du ciment utilisé est d'après la fiche technique :

- Début de prise : 02^h 08 ;
- Fin de prise : 03^h 04.

D'après les caractéristiques physiques étudiées, nous constatons que :

- La finesse élevée du ciment utilisé aura pour effet l'augmentation de la résistance mais elle aura une tendance à un retrait important;

III.3.2.3. Caractéristiques chimiques

L'analyse chimique du ciment utilisé d'après la fiche de qualité a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Composition chimique du ciment en %.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
21,90	5,73	3,13	60,18	1,85	2,29	0,19	0,83	4,07

Nous remarquons que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables en chaux et en silice.

$$\% \text{ Alcalis} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} = 0,736 > 0,6\%.$$

Mais il n'y a pas risque de réaction alcalis-granulats car ces derniers ne sont pas des calcaires dolomitiques (Gorisse, 1978; Dupain et al., 2000).

III.3.2.4. Composition minéralogique du clinker

De nos jours, une grande variété de ciments est produite dans presque tous les pays du monde. Les matières premières, essentiellement argilo-calcaire, sont rigoureusement proportionnées et chauffées à environ 1450°C pour former un produit composé de silicates de calcium et d'aluminates, appelé "clinker". Ce produit, est finement broyé avec du gypse pour produire le "ciment Portland" (Costa, 2015). Il est composé essentiellement par quatre phases cristallines (Tableau III.2).

l'eau remplit deux fonctions : D'une part, elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte.

L'analyse chimique de l'eau a été effectuée au laboratoire traitement des eaux de l'université d'Ouargla, les résultats sont présentés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Composition chimique de l'eau.

Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	pH
242	125	31	536	755	14,5	755	124	7,75

* Les concentrations sont données en mg/l

D'après les résultats exposés dans le tableau III.4, il s'agit d'une eau qui présente une faible salinité (Gorisse, 1978), pouvant être utilisée pour les bétons et mortiers normaux.

III.3.4. Les fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de nature métallique issues des pneus usés (Photo III.1 et III.2). Le choix de la fibre a été fait, dans le but d'une valorisation d'un déchet industriel.

La collecte et l'extraction des fibres métalliques issues de pneus usés sont effectuées comme suit :

La collecte des pneus usés est faite au près des vulcanisateurs par le procédé de triage des pneus par catégorie, une fois l'opération de tri est terminée, on passe à la deuxième étape qui concerne l'extraction des fils métalliques constituant l'armature des pneus, cette dernière est faite par incinération qui est un procédé d'urgence du fait, qu'il y a d'autres méthodes plus écologique mais qui nécessite tout de même tout une industrie. Parmi ces méthodes qui permettent de séparer les principaux composants des pneus, Shulman (2011) cite le traitement par des températures basses (processus cryogénique) en utilisant par exemple le nitrogène liquide ainsi que certaines nouvelles technologies telles que l'utilisation des microbes.

Une fois cette opération est terminée on attend jusqu'à ce que la température baisse, à ce moment on passe à l'étape la plus importante qui consiste à la récupération des files métalliques, on les faisant assembler sous forme de faisceaux pour enfin, les découper selon les longueurs voulues (Photo III.1 et III.2).

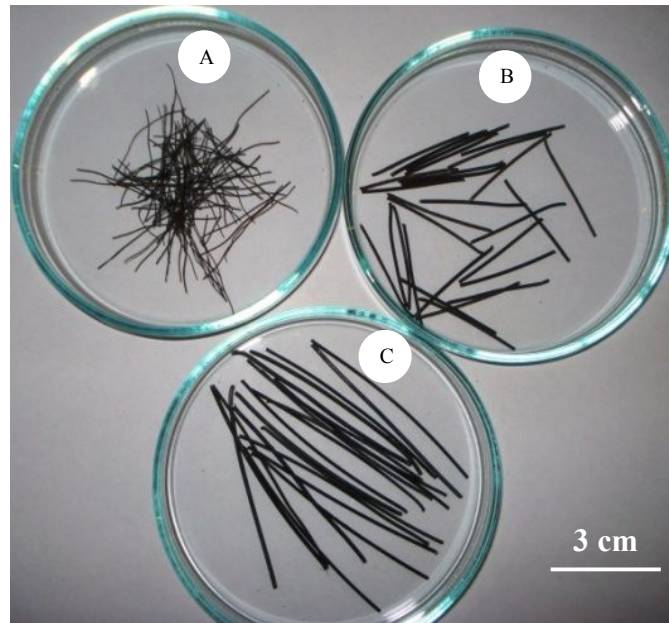


Photo III.1: Fibres métalliques issues de pneus usés. Dimensions des fibres: "A": $l_f = 4$ cm, $d_f = 0,28$ mm; "B": $l_f = 3$ cm, $d_f = 0,9$ mm; "C": $l_f = 6$ cm, $d_f = 0,9$ mm.

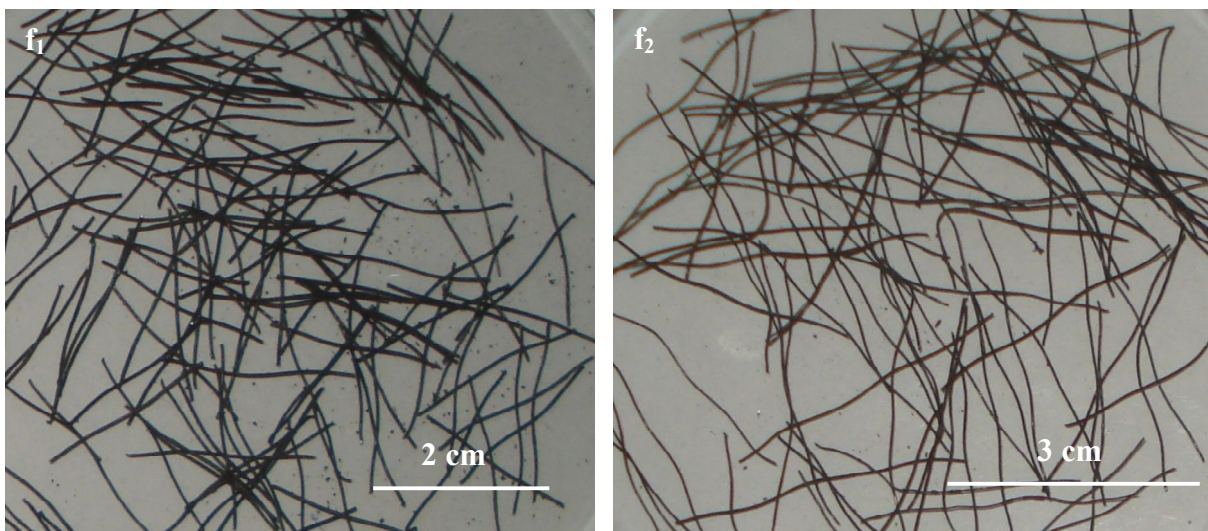


Photo III.2: Fibres métalliques issues de pneus usés. Dimensions des fibres: "f₁": $l_f = 2$ cm, $d_f = 0,28$ mm; "f₂": $l_f = 3$ cm, $d_f = 0,28$ mm.

III.3.5. Les adjuvants

Les adjuvants sont des composants très importants dans les bétons modernes qui permettent de modifier certaines propriétés du béton à l'état frais ou durci. En dispersant les grains de ciment et autres fines on peut, soit réduire la demande en eau (adjuvants-réducteur d'eau), soit, à dosage en eau constant, rendre le béton fluide (adjuvants plastifiants ou super-plastifiants).

III.3.5.1. Caractéristiques des adjuvants utilisés

L'adjuvant utilisé dans cette étude est un super-plastifiant, de type "MEDAPLAST- SP". Il est conçu à base de polycarboxylates d'éther modifiés; c'est une solution liquide, se diluant facilement dans l'eau de gâchage. Le dosage utilisé est de 2% du poids du ciment. C'est le dosage généralement recommandé par les fiches techniques du fabricant pour les bétons (Granitex, 1999). Il présente les caractéristiques illustrées dans le tableau III.5.

Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du superplastifiant utilisé.

Forme	liquide
Couleur	marron
pH	7-8
Densité	1,18
Teneur en chlorure	< 1g / l

III.4. Méthodes utilisées dans la caractérisation des matériaux

III.4.1. Sable

La caractérisation des sables est réalisée à travers plusieurs essais à savoir : la masse volumique absolue et apparente (norme NFP 18-555), le coefficient d'absorption (norme NFP 18-555), l'équivalent de sable (norme NFP 18-598), l'analyse granulométrique (norme NFP 18-560), la morphoscopie des grains de sable et l'analyse minéralogique par diffractométrie à rayons X.

III.4.1.1. Morphoscopie des grains de sable

Les échantillons du sable de dunes et du sable alluvionnaire ont été observés sous la loupe binoculaire en vue de décrire leur forme et leur nature.

III.4.1.2. Analyse minéralogique par diffractométrie à rayons X (DRX)

L'analyse minéralogique du sable de dunes et du sable alluvionnaire a été effectuée par diffraction des rayons X, pour caractériser les minéraux présents dans ces échantillons. Ces derniers ont été finement broyés puis déposés sur des portes échantillons.

Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un appareil Bruker D8.Advance dont les caractéristiques sont:

- L'énergie: 40 kV, 10 mA ;
- Anticathode en cuivre ;
- Longueur d'onde: $\lambda = 1,5408$ nm.

L'interprétation qualitative des diffractogrammes de rayons X des échantillons des sables a été réalisée à l'aide du logiciel "X'PERT High Score Plus" en plus d'une vérification manuelle. L'estimation semi-quantitative des proportions des différents minéraux est obtenue par la méthode « Peak-height Ratio ».

III.4.2. Fibres

III.4.2.1. Masse volumique absolue

Cet essai est réalisé sur dix 10 échantillons en utilisant la méthode de l'éprouvette graduée.

III.4.2.2. Essai de traction sur les fibres

Les essais de ruptures sur les fibres ont été réalisés à l'aide d'une machine appelé Frank Machine d'essai de traction 85649 (Photo III .3) ; elle sert à l'essai de traction sur métaux (fils, tôles), élastomères (bandes, fils), polymères, textiles (fils, tissus), papier et matériaux similaires. Elle est munie de dispositifs pour la mesure mécanique de la force et de l'allongement. La précision du système de mesure de la force est de $\pm 1\%$ à partir d'un dixième du domaine de mesure de la force respectif selon DIN 51221, classe1, la vitesse de chargement est de l'ordre de 2,5 mm/min.

La première phase consiste à mesurer les diamètres exactes ainsi que les longueurs des fils ; dans ce cas nous avons choisi des fils de diamètres respectifs $D_1 = 0,9$ mm et $D_2 = 0,28$ mm et ayant des longueurs $L_1 = 100$ mm, $L_2 = 140$ mm et $L_3 = 180$ mm. Par la suite vient l'étape de la réalisation de l'essai de traction sur l'ensemble des fils qui nous permet de déterminer les contraintes de traction de chaque type de fibres.

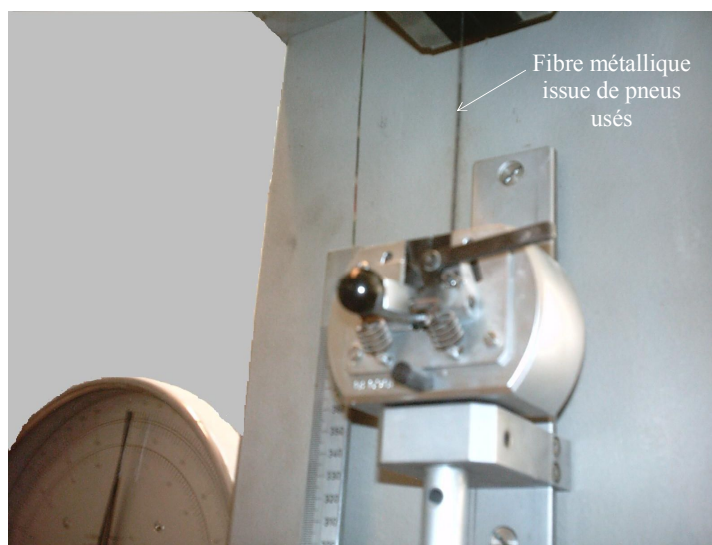


Photo III.3 : Machine d'essai de traction

III.5. Béton

Plusieurs essais de caractérisation des bétons sont réalisés, parmi lesquelles on trouve les essais sur béton frais dans ce cas c'est l'essai de maniabilité et les essais sur béton durci à savoir : les essais mécaniques (traction et compression) et rhéologiques (retrait).

III.5.1. Formulation des bétons

Une fois la caractérisation des constituants rentrant dans la composition des bétons a été accomplie, on procède à la détermination de leurs dosages respectifs, et cela dans le but d'avoir un béton ayant les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologique souhaitées. Les étapes et le procédé de formulation ont été établis suivant le schéma présenté sur la figure III.2.

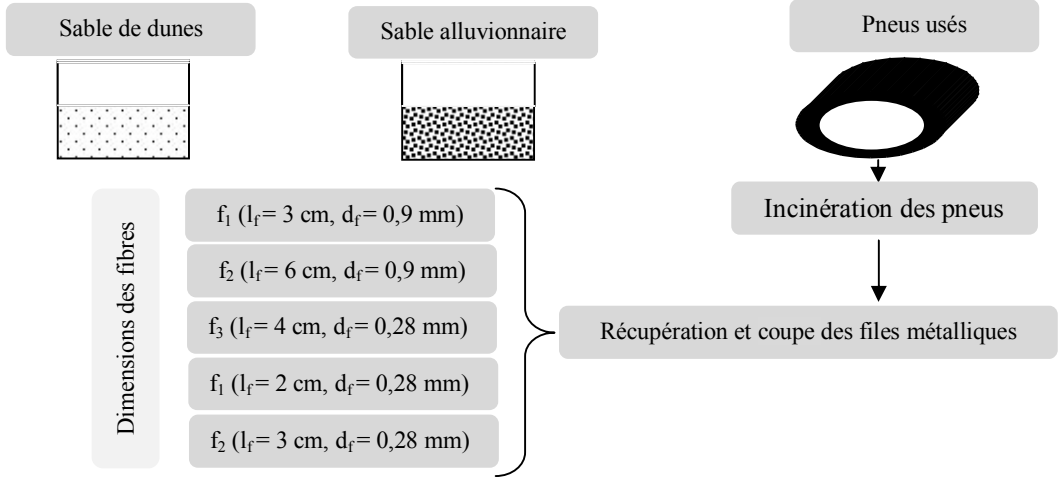
III.5.1.1. Formulation du béton de sable de dunes

Pour la composition du béton de sable témoin (BSD), nous avons utilisé un dosage en ciment et sable qui correspond à celui d'un mortier normalisé conformément à la norme EN 196-1; c'est à dire une part de ciment et trois part de sable. Concernant le dosage en eau nous avons utilisé l'essai de l'étalement à la table à secousses (Flow test) et l'essai Vébé, pour la détermination de la quantité d'eau correspondant à un mortier "plastique". Un rapport E/C de 0,6 est obtenu à partir de ces tests.

Pour la formulation du béton de sable de dunes renforcé de fibres métalliques (BSD_f), un rapport fixe E/C de 0,6 a été maintenu. Trois types de fibres ont été utilisées (Photo III.1); f_1 ($l_f = 30$ mm, $d_f = 0,9$ mm), f_2 ($l_f = 60$ mm, $d_f = 0,9$ mm) et f_3 ($l_f = 40$ mm, $d_f = 0,28$ mm). La quantité des fibres incorporées en volume est de 1% et 1,5%, tout en substituant le volume de sable par un même volume de fibres (volume fixe), mais à masse volumique variable, du fait de l'introduction des fibres dans la matrice.

En effet, l'introduction d'une certaine quantité de fibres dans une matrice de béton avec ou sans gravier diminue d'une manière significative la maniabilité. A cet effet, l'ajout d'un adjuvant (super-plastifiant) afin d'améliorer cette dernière est souvent nécessaire dans la composition des bétons de sable renforcé par des fibres métalliques. La quantité habituelle de fibres métalliques est comprise entre 0,25% et 2% en volume (ACI, 1998). Pour une bonne maniabilité des mélanges utilisés dans ce travail, la quantité de fibres est limitée à 1,5%. En effet, Wafa (1990) indique que, pour un pourcentage de fibres incorporé dans la matrice égal à 2,0%, il a été remarqué des difficultés de consolidation du béton en utilisant un vibreur interne. Les proportions des mélanges sont présentées au niveau du tableau III.7. En fonction du volume et du type de fibres, six types de bétons de sable de dunes renforcées de fibres métalliques ont été préparés, en plus de béton de sable de dunes sans fibres (Béton témoin). Les mélanges ont été

Matériaux utilisés



Formulation du béton

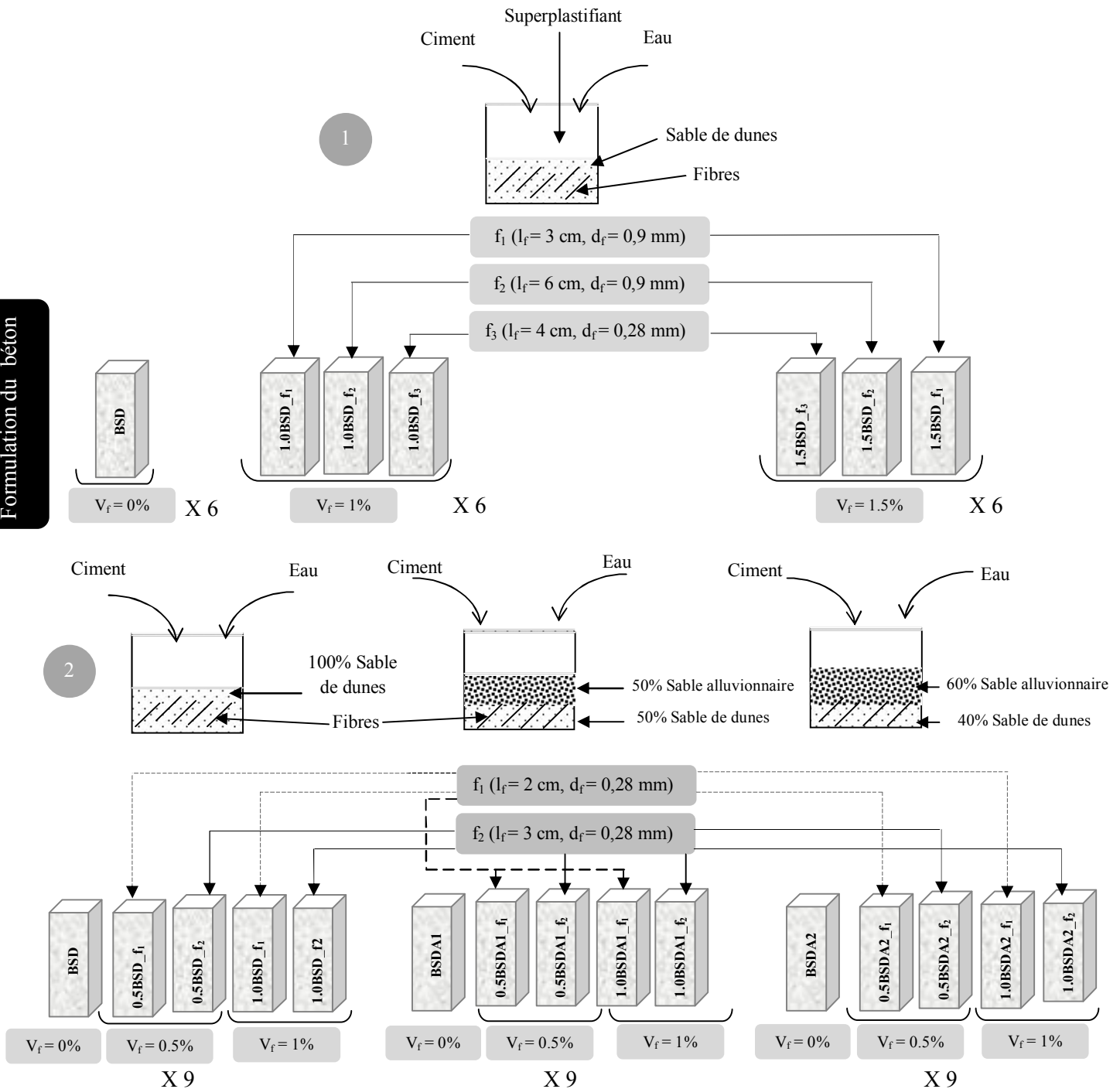


Figure III.2: Schéma montrant les étapes et le procédé de formulation des bétons.

désignés par les notations suivantes : 1,0 ou 1,5 pour indiquer le volume de fibres et f_1 , f_2 ou f_3 pour le type de fibres. A titre d'exemple: 1.0BSD_ f_1 .

Table III.6: Proportion des mélanges (1m^3).

Mixtures	Fibres (%)	Sable (Kg)	Ciment (Kg)	Eau (l)	Fibres (Kg)	Superplastifiant (Kg)
BSD	0	1389,13	463,04	277,83	/	/
1.0BSD_ f_1	1,0	1364,13	463,04	277,83	78,5	4,63
1.0BSD_ f_2	1,0	1364,13	463,04	277,83	78,5	4,63
1.0BSD_ f_3	1,0	1364,13	463,04	277,83	78,5	4,63
1.5BSD_ f_1	1,5	1351,63	463,04	277,83	117,75	4,63
1.5BSD_ f_2	1,5	1351,63	463,04	277,83	117,75	4,63
1.5BSD_ f_3	1,5	1351,63	463,04	277,83	117,75	4,63

Des éprouvettes prismatiques de 40x40x160 mm ont été utilisées dans cette étude. Le sable et le ciment ont été mélangés à sec pendant 60 secondes. Les fibres métalliques ont été incorporées par petites quantités, afin de permettre aux fibres d'être distribuées d'une manière homogène. L'ajout de la quantité d'eau nécessaire mélangée avec le superplastifiant, puis malaxage de l'ensemble pendant 3 minutes. Le remplissage des moules est réalisé en deux couches avec vibration pour chacune pendant 30 secondes. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre. Après 24 heures de durcissement, elles sont démoulées et plongées dans l'eau à $25 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant une durée de 14 jours. Ensuite, les éprouvettes sont retirées de l'eau et exposées aux conditions de laboratoire ($T = 30 \pm 5^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 25 \pm 2\%$) jusqu'à la date d'essais. En effet, Kriker (2005) a constaté que d'une façon optimale une période d'humidification initiale de 14 jours est nécessaire, afin d'améliorer les performances mécaniques des bétons dans les climats chauds et secs.

Dans ce travail, le nombre d'éprouvettes utilisés par essai et par échéance est de six.

III.5.1.2. Formulation du béton de sable de dunes corrigé

Le sable de dunes présente une anomalie qui réside dans ses grains très fins ayant un module de finesse se situant en dehors du fuseau granulométrique recommandé par la norme. De ce fait, une correction de sa granulométrie s'avère nécessaire. Une série de tests a été réalisées et qui s'est soldé par l'adoption des proportions du sable alluvionnaire utilisé comme ajouts dans la correction de la granulométrie du sable de dunes.

L'essai Vébé et l'essai au maniabilimètre "B" ont été utilisés pour la détermination de la proportion d'eau. Deux rapports E/C de 0,58 et 0,6 ont été obtenus (tableau III.8). Quinze mixtures ont été utilisées. Leurs compositions sont présentées au niveau du tableau III.8.

Trois bétons témoins désignés par BSD (100% sable de dunes), BSDA1 (50% sable de dunes + 50% sable alluvionnaire), BSDA2 (40% sable de dunes + 60% sable alluvionnaire) étaient préparés. La raison du choix de ces différentes proportions de sable sera discutée plus tard (Chapitre IV).

Sur la base des mélanges de béton témoins, les bétons de sable renforcés de fibres métalliques ont été confectionnés pour des volumes différents de fibres (0,5 et 1,0%) et deux types de fibres: f_1 ($l_f = 2$ cm, $d_f = 0,28$ mm) et f_2 ($l_f = 3$ cm, $d_f = 0,28$ mm). Les mélanges de béton renforcés de fibres métalliques ont été désignés par les notations suivantes: 0,5 ou 1,0 représente la fraction volumique de fibres, suivie par la notation représentant la désignation de la mixture, et f_1 ou f_2 pour le type de fibres. A titre d'exemple: 1.0BSDA1_ f_1 .

Tableau III.7 : Proportions des mélanges (1m³).

Mixtures	Fibres (%)	Sable de dunes (kg)	Sable alluvionnaire (kg)	Ciment (kg)	Eau (l)	Fibres (kg)	E/C (%)
BSD	0,00	1382,61	0,00	460,87	276,52	0,00	0,60
0.5BSD_ f_1	0,50	1375,79	0,00	460,87	276,52	39,25	0,60
0.5BSD_ f_2	0,50	1375,79	0,00	460,87	276,52	39,25	0,60
1.0BSD_ f_1	1,00	1369,15	0,00	460,87	276,52	78,50	0,60
1.0BSD_ f_2	1,00	1369,15	0,00	460,87	276,52	78,50	0,60
BSDA1	0,00	694,32	694,32	462,88	268,47	0,00	0,58
0.5BSDA1_ f_1	0,50	690,78	690,78	462,88	268,47	39,25	0,58
0.5BSDA1_ f_2	0,50	690,78	690,78	462,88	268,47	39,25	0,58
1.0BSDA1_ f_1	1,00	687,24	687,24	462,88	268,47	78,50	0,58
1.0BSDA1_ f_2	1,00	687,24	687,24	462,88	268,47	78,50	0,58
BSDA2	0,00	555,46	833,18	462,88	268,47	0,00	0,58
0.5BSDA2_ f_1	0,50	552,70	829,04	462,88	268,47	39,25	0,58
0.5BSDA2_ f_2	0,50	552,70	829,04	462,88	268,47	39,25	0,58
1.0BSDA2_ f_1	1,00	549,94	824,90	462,88	268,47	78,50	0,58
1.0BSDA2_ f_2	1,00	549,94	824,90	462,88	268,47	78,50	0,58

Le mode de préparation des éprouvettes était de la même manière que celui du béton de sable de dunes. Excepté pour la cure des éprouvettes destinées à l'évaluation du retrait où ces dernières ont été conservées à l'air libre du laboratoire sous les conditions de température et d'humidité respectives de (T: 25-35°C, H: 40% \pm 10) pendant toute la durée de mesure.

III.5.2. Caractéristiques du béton à l'état frais

III.5.2.1. Les essais d'ouvrabilité

Dans ce travail l'ouvrabilité du béton de sable est mesurée à l'aide de divers essais à savoir : la table à secousses (flow test), essai Vébé et l'essai d'écoulement au maniabilimètre (LCPC).

III.5.2.1.1. Essai de l'étalement à la table à secousses (Flow test)

Cet essai (Flow test) est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton avec ou sans gravier à s'étaler par écoulement (Dreux et Festa, 1998), afin de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour la composition de ce dernier (Figure III.3). Il est défini et réalisé selon la norme NF EN 12350-5.

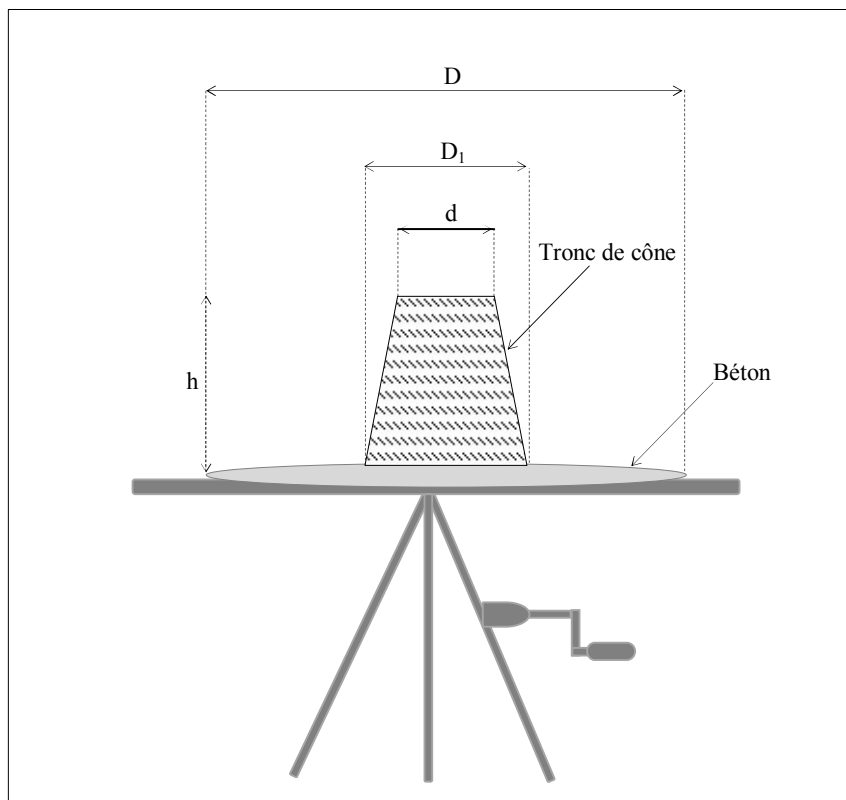


Figure III.3 : Table à secousses (Flow test)
(Dreux et Festa, 1998).

III.5.2.1.2. L'essai Vébé

C'est un essai qui est défini par la norme NF EN 12350-3. Spécialement destiné à tester les bétons à faible ouvrabilité. Il nous permet de mesurer le temps nécessaire en secondes que met un cône de béton avec ou sans gravier pour s'écouler à l'intérieur d'un moule posé sur une table vibrante (Figure III.4).

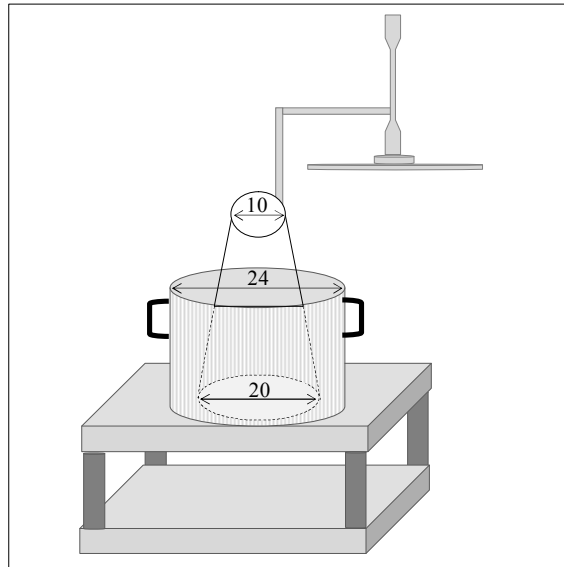


Figure III.4 : Essai Vébé.

III.5.2.1.3. Essai au maniabilimètre (LCPC)

Cet essai permet d'estimer la fluidité des bétons (maniabilimètre A) et des mortiers (maniabilimètre B (Figure III.5)) par la mesure du temps d'écoulement de ces derniers. Il est défini conformément à la norme NF P 18-452 et NF P 15 -437.

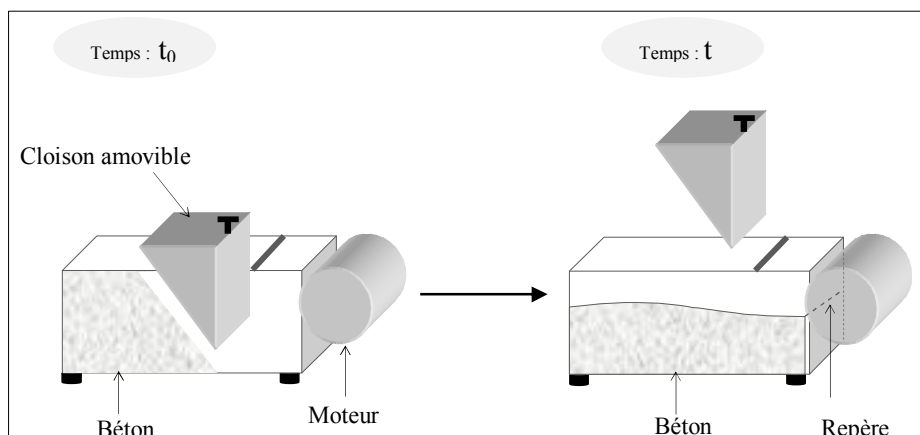


Figure III.5 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre "B".

III.5.3. Caractéristiques du béton à l'état durcis

III.5.3.1. Essai de résistance mécanique

Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances à 28 jours. Cette dernière est souvent influencée par plusieurs facteurs, entre autres le rapport E/C, le dosage et la classe de ciment, la nature et les proportions des granulats, les conditions climatiques et de mise en œuvre sans oublier l'influence des ajouts (Fillers, Fibres,...). La mesure de la résistance se fait par les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression des bétons.

III.5.3.1.1. Essai de traction par flexion

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1. La figure III.6 présente le dispositif à rouleau utilisé en flexion trois points ; comportant deux appuis à rouleau distant de 100 mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique 40x40x160 mm, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée F_f (Dupain et al., 2000).

La formule qui nous permet de calculer la résistance à la flexion est comme suit :

$$R_f = 1,5 \frac{F_f}{b^3} l \dots \dots \dots (III. 4)$$

Où :

R_f : Résistance à la flexion en MPa ;

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion N ;

l : Longueur qui sépare les deux appuis inférieurs en mm ;

b : Côté de l'éprouvette en mm.

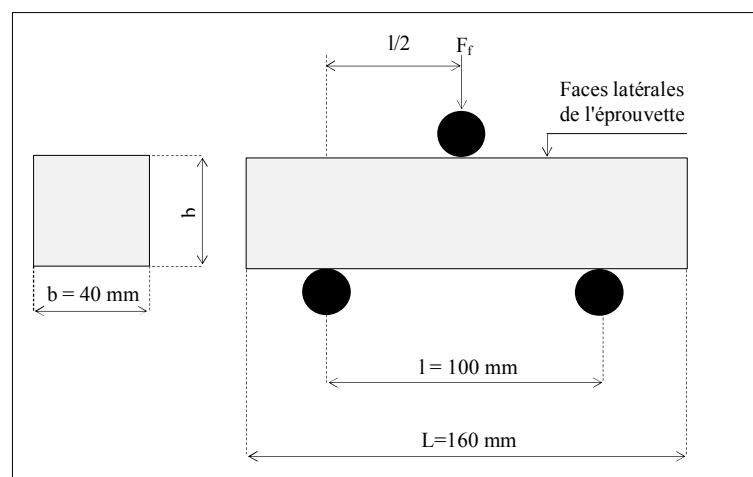


Figure III.6 : Dispositif pour l'essai de traction par flexion (3 points) (Dupain et al., 2000)

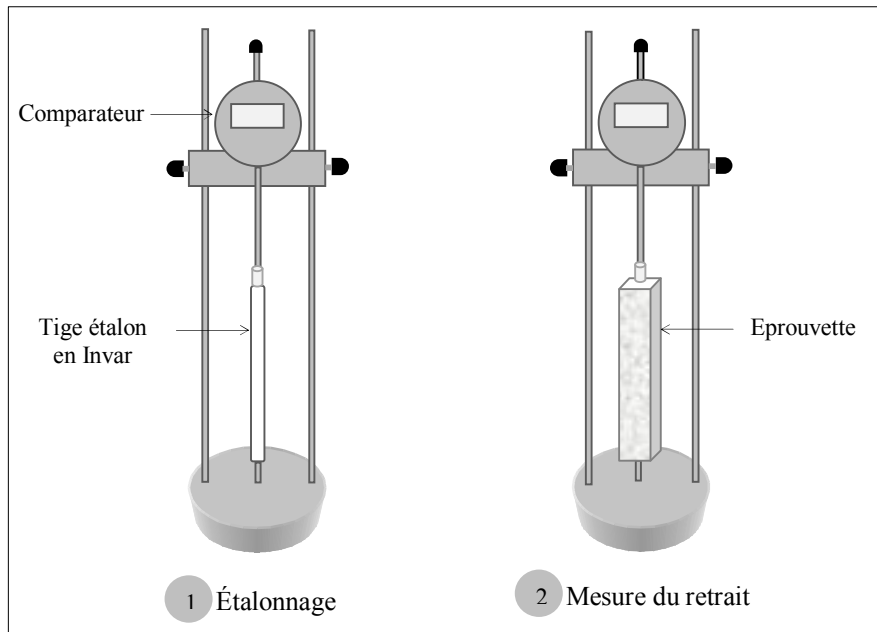


Figure III.8: Appareillage pour la mesure du retrait (Rétractomètre).

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons tenté au premier lieu de donner une justification quant au choix et la nature des matériaux utilisés, en mettant l'accent sur la valorisation du sable de dunes et des pneus usés. Par la suite nous nous sommes donné la tâche de présenter chacun des éléments constituant le béton de sable objet de notre étude, les méthodes utilisées pour la caractérisation de chaque constituant en prenant le soin de bien respecter les normes universellement reconnues ainsi que le mode de formulation du béton, et enfin les essais de caractérisation des bétons à l'état frais et durcis.

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Les matériaux composites en l'occurrence les bétons, et plus particulièrement ceux réalisés à base de déchets industriels recyclés et de matériaux locaux valorisés, sont devenus ces dernières décennies le centre d'intérêt de l'ensemble des chercheurs dans le domaine de la construction, cette nouvelle orientation est alimentée par le désir d'utilisation des produits propres ayant à la fois un impact économique et environnemental. De ces faits, un nombre important d'études ont été consacrées aux développements et à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons.

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter l'effet de l'ajout des fibres métalliques issues de pneus usés et la correction granulométrique du sable de dunes par un sable alluvionnaire, sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

IV.2. Etude des propriétés du béton de sable de dunes

La connaissance des qualités ou des défauts des propriétés des bétons est liée aux constituants de base, à la formulation du matériau et à la pratique de mise en œuvre. Dans ce cas de figure nous allons aborder, au premier lieu les propriétés des matériaux utilisés dont les propriétés physiques du sable de dunes et des fibres métalliques issues de pneus usés suivie de propriétés mécaniques de ces dernières. Au second lieu, les propriétés des bétons frais et enfin on termine par la présentation des propriétés mécaniques des bétons confectionnés.

IV.2.1. Etude des propriétés des matériaux utilisés

La caractérisation des constituants de base à savoir : le sable de dunes et les fibres métalliques issues de pneus usés, nous permet d'avoir une idée générale sur les caractéristiques

du matériau souhaité, en se basant sur les résultats de différents essais (analyse granulométrique, équivalent de sable, masse volumique apparente et absolue et le coefficient d'absorption).

IV.2.1.1. Propriétés physiques du sable de dunes

Les propriétés physiques du sable nous renseigne habituellement sur la qualité du sable de point de vu propreté, granularité, absorption et masses volumiques, l'importance de ces propriétés réside dans leurs contribution à la formulation du béton.

L'analyse granulométriques nous a permis de déterminer la valeur du module de finesse du sable de dunes (Tableau IV.1), où nous remarquons qu'avec un module de finesse $M_f = 1,33$; et en se référant à la classification recommandée par les normes, il s'agit d'un sable très fin avec une granulométrie très serrée ayant des dimensions rangées entre 0,08 et 0,315 mm, et une absence totale d'éléments entre 0,315 et 5 mm. La figure IV.1 présentant la distribution granulométrique du sable de dunes, montre qu'une grande partie de la courbe granulométrique est située en dehors du fuseau recommandé par la norme AFNOR NFP 18-541 pour la confection des bétons. De ce fait, une correction de cette courbe granulométrique est plus que souhaitable.

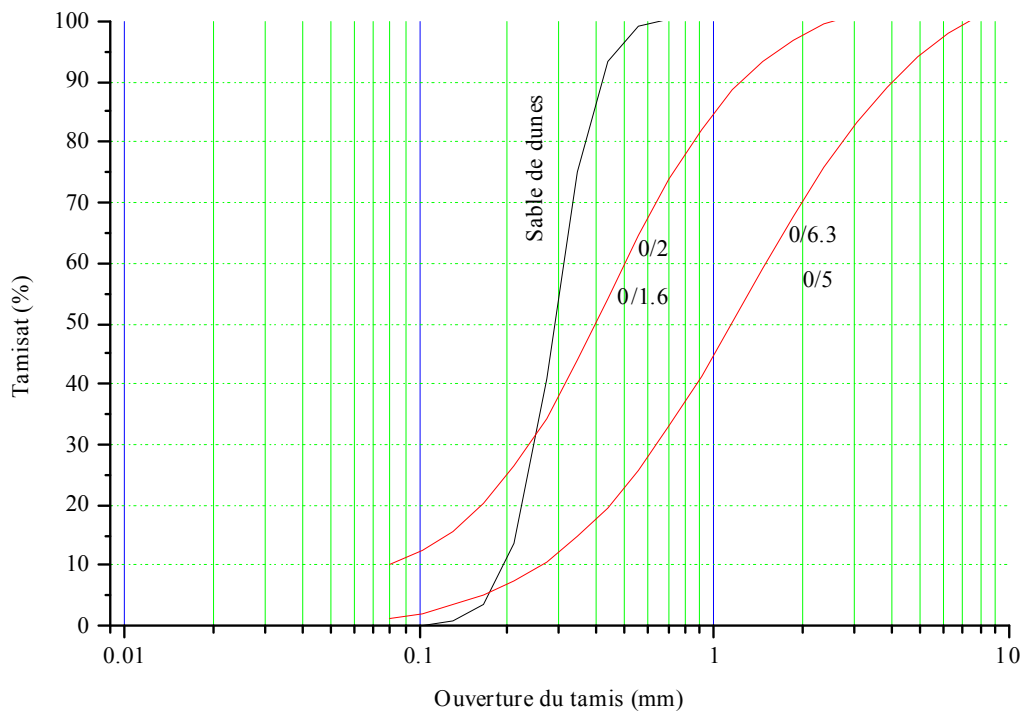


Figure IV.1 : Courbe granulométrique du sable de dunes.

Quant à l'équivalent de sable le résultat obtenu pour le sable de dunes est de l'ordre de $ES = 98\%$ (Tableau IV.1), ce résultat indique qu'il s'agit d'un sable très propre. D'où nous pouvons conclure qu'il y a une absence totale ou presque de fines argileuses, risquant d'entraîner un défaut

de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau ou par l'utilisation d'un adjuvant.

Un autre facteur important parmi les propriétés physiques est le coefficient d'absorption d'eau ayant une valeur $A_b = 0,66\%$. D'après ce résultat (Tableau IV.1), les grains de sable utilisés ont une capacité d'absorption dans la limite recommandée par les normes XP P 18-540. De ce fait, nous pouvons dire qu'elle est acceptable.

Tableau IV.1 : Propriétés physiques de sable de dune.

M. volumique apparente (kg/m ³)	M. volumique absolue (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Equivalent de sable (%)	Module de finesse (%)
1487	2500	0,66	98	1,33

IV.2.1.2. Propriétés physiques et mécaniques des fibres issues des pneus usés

Les essais effectués sur les fibres issues des pneus usés, ont montré que la valeur de la masse volumique est de l'ordre de 7890 Kg/m³ qui se rapproche de près de la masse volumique absolue d'un acier normal (7850 Kg/m³). Ce qui nous a permis de conclure qu'apparemment le procédé d'incinération n'a pas trop influé sur la valeur de la masse volumique des fibres utilisées.

En outre, les résultats des essais sur les fibres de pneus usés ayant comme trait la détermination des contraintes de traction ainsi que les modules d'élasticités des fibres, sont présentés sur les figures IV.2, IV.3, IV.4 et IV.5.

L'essai qui nous a permis la détermination à la fois des valeurs des forces de traction à la rupture et les allongements, a été pratiqué sur des fibres de longueurs respectives de 100, 140 et 180 mm (Figure IV.2 et IV.4), à partir desquelles les valeurs des forces à la rupture (Tableau IV.2) correspondant respectivement aux longueurs $l_f = 30, 40$ et 60 mm ont été déduites. Ensuite, à partir des valeurs des forces et des allongements, les contraintes et les déformations correspondantes ont été déterminées, ce qui nous a permis de tracer les courbes contraintes-déformations (Figure IV.3 et IV.5). Enfin les valeurs des modules de déformations (Tableau IV.2) ont été déterminées par la formule IV.1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(IV.1)$$

Où : E : Module de déformation ; σ : Résistance de traction ; ε : Déformation.

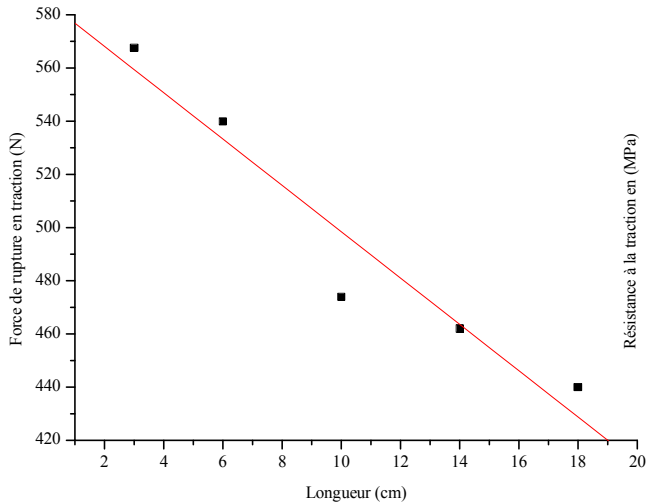


Figure IV.2 : Force de rupture en traction pour fibre de $d = 0,9$ mm en fonction de la longueur.

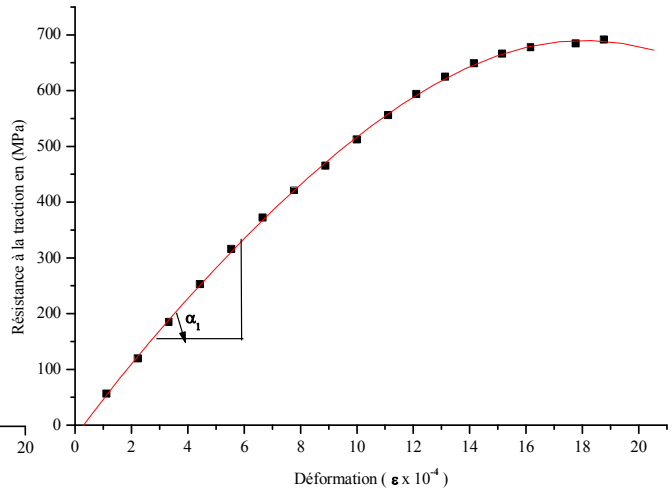


Figure IV.3 : Courbe (contrainte-déformation) en traction pour fibre de $d = 0,9$ mm.

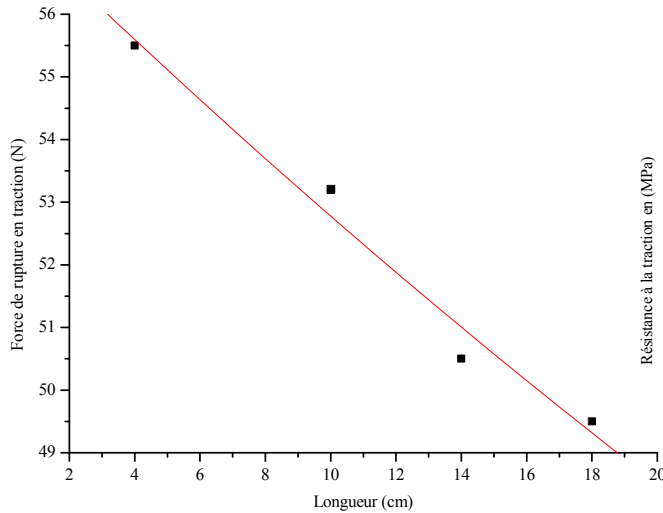


Figure IV.4 : Force de rupture en traction pour fibre de $d = 0,28$ mm en fonction de la longueur.

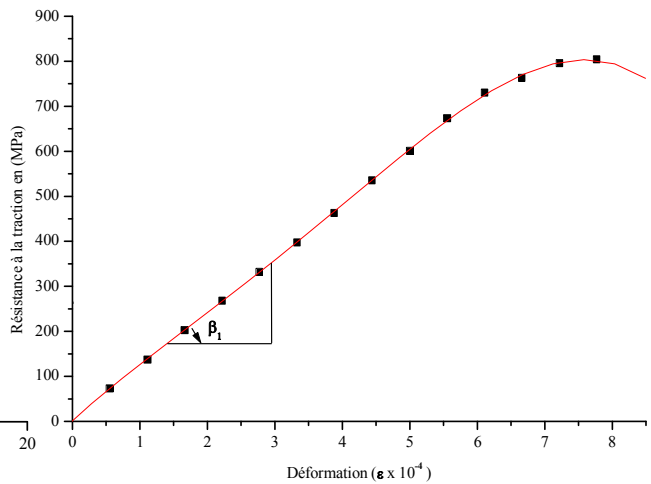


Figure IV.5 : Courbe (contrainte-déformation) en traction pour fibre de $d = 0,28$ mm.

Les résultats présentés dans le tableau IV.2 indiquent que les fibres utilisées possèdent une bonne résistance, néanmoins si nous la comparons avec celles citées dans la littérature, sa résistance est légèrement inférieure à celles des fibres (Dramix et Novatex). Mais en revanche, les fibres utilisées et notamment celles ayant un diamètre $d = 0,28$ mm présentent un excellent module d'élasticité. Cette différence de résistance entre les fibres de diamètre $d = 0,9$ mm et $d = 0,28$ mm est peut être attribué à la différence de composition et au traitement de l'acier qui les compose. Finalement, on peut conclure suite aux résultats obtenus, que ces fibres peuvent être utilisées d'une manière efficace comme renfort dans les bétons.

Tableau IV.2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres issues de pneus usés (f_1 , f_2 et f_3) et des fibres Dramix et Novocon.

Fibres	Références	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	l/d /	Charge de rupture (N)	R_t (MPa)	M. d'élasticité (GPa)
f_1	-	0,9	30	33,33	567,50	892,05	387,01
f_2	-	0,9	60	66,66	540,00	848,83	387,01
f_3	-	0,28	40	142,86	55,50	901,33	926,34
Dramix	Chanvillard (1993)	0,4-0,8	25-60	62,5-75	-	1100	-
Novocon	Chanvillard (1993)	0,7	30	42,86	-	1150	-

R_t : Contrainte de traction

IV.2.2. Les propriétés du béton frais

IV.2.2.1. Maniabilité

La maniabilité du béton de sable témoin (sans fibres) est mesurée à l'aide de l'essai d'étalement à la table à secousses (Flow test). Le tableau IV.3 montre les résultats du diamètre de l'étalement en fonction des rapports E/C rangés entre 0,50 et 0,60. Ces résultats correspondent à la moyenne de trois mesures.

Tableau IV.3 : Diamètre de l'étalement du béton de sable de dunes ($1m^3$).

E/C (%)	Sable (kg)	Cement (kg)	Eau (l)	Etalement (cm)	Etalement (%)
0,50	1420,00	473,33	236,66	44,43±0,01	77,73±0,02
0,55	1404,40	468,13	257,47	38,91±0,02	55,66±0,07
0,60	1389,12	463,04	277,82	37,60±0,01	50,04±0,04

Les rapports E/C ayant les valeurs 0,5 et 0,55 ne correspondent pas aux résultats souhaités, du fait, qu'après l'essai nous avons observé un manque de fluidité qui s'est manifesté par une discontinuité dans la pâte du béton de sable de dune (BSD). Quant au rapport E/C = 0,60, une meilleure fluidité du béton de sable que celle observée pour les deux rapports E/C de valeurs 0,50 et 0,55 a été obtenue, avec une forme circulaire et sans ségrégation de la pâte, possédant un diamètre de l'étalement moyen de 37,60 cm, qui correspond à un béton de classe F₂ suivant la norme standard ENV 206 (Dupain et al., 2000).

Quant aux bétons de sable renforcés de fibres métalliques issues de pneus usés, la maniabilité est mesurée à l'aide de l'essai Vébé selon la norme NF EN 12350-3. Plusieurs auteurs (Köksal et al., 2008; Gencel et al., 2011; Marar et al., 2011; Pawade Prashant et al., 2011), attestent que l'introduction d'un certain pourcentage de fibres dans le béton avec ou sans gravier réduit la maniabilité d'une manière significative. A cet effet, l'utilisation d'un adjuvant (super-plastifiant) afin d'améliorer la maniabilité est nécessaire dans la composition des bétons de sable renforcés de fibres métalliques (BSD_f).

Concernant la fabrication des bétons destinés aux essais mécaniques (compression et traction), le même rapport E/C pour les bétons de sable de dunes avec et sans fibres a été adopté, afin de pouvoir faire une comparaison entre les résultats trouvés ; C'est-à-dire nous avons pris le soin d'éliminer l'effet de l'eau sur l'amélioration des résistances mécaniques pour les mélanges BSD et BSD_f. Pour ces derniers possédant les caractéristiques d'un béton plastique ou béton ayant une bonne ouvrabilité avec un temps d'écoulement situé entre 20 et 30 secondes, un additif en forme d'un super-plastifiant a été adopté afin d'améliorer et de maintenir la fluidité du mélange. La figure IV.6 montre le pourcentage optimal du super-plastifiant utilisé pour l'ensemble des mélanges. Son dosage est maintenu constant à 1,0% de la masse du liant utilisé dans la réalisation des bétons.

La figure IV.6 montre aussi qu'il y a une proportionnalité entre le pourcentage des fibres et l'élanement l/d d'un côté et le temps d'écoulement de l'autre ; c'est-à-dire que l'accroissement du temps d'écoulement du béton de sable de dunes est tributaire de l'augmentation de l'introduction du pourcentage des fibres et leurs élanement l/d , cela est valable pour l'ensemble des mixtures utilisées dans ce travail. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le temps d'écoulement du béton le plus élevé est enregistré par la mixture 1.5BSD_f₃, ayant un dosage en fibres de 1.5% et un élanement $l/d = 142,86$. Cependant, le temps d'écoulement le plus bas est obtenu par la mixture 1.0BSD_f₁ avec un dosage en fibres de 1.0% et un élanement $l/d = 33,33$.

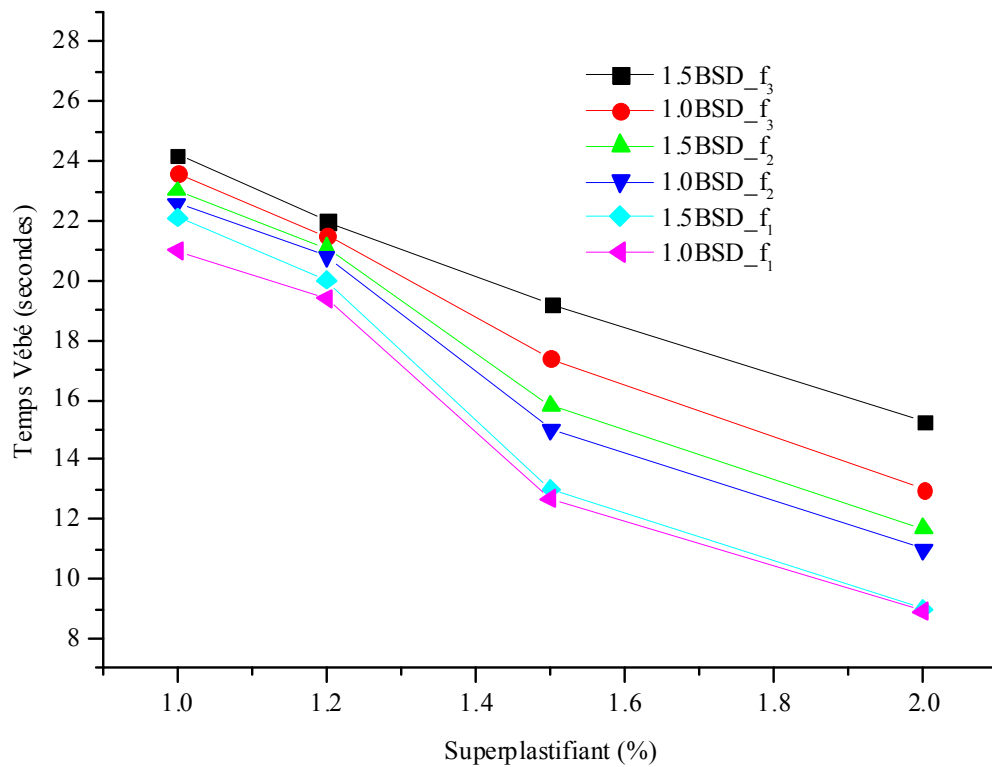


Figure IV.6 : Temps Vébé des BSD_f en fonction du super-plastifiant.

IV.2.3. Propriétés mécaniques du béton de sable de dunes

Les matériaux qu'ils soient en acier, en plastiques, en bois ou en bétons subissent des transformations et des améliorations continues, en tenant compte plus particulièrement du comportement mécanique des matériaux, de leurs coûts et de leurs impacts vis-à-vis de l'environnement. Dans ce qui suit nous allons aborder les propriétés mécaniques des bétons de sable de dunes avec et sans fibres.

IV.2.3.1. Résistance à la compression

Nombreux sont les paramètres qui influent sur la résistance à la compression du béton de sable de dunes renforcés par les fibres parmi lesquelles on trouve :

- Le pourcentage et la longueur des fibres métalliques ;
- Le rapport longueur/diamètre (l/d) ;
- La rigidité des fibres.

IV.2.3.1.1. L'effet du pourcentage et la longueur des fibres métalliques

Les résultats exposés sur les figures IV.7, IV.8 et IV.10 montrent une amélioration de la résistance à la compression pour les différents mélanges des bétons de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques issues de pneus usés (BSD_f) par rapport aux bétons de sable de dunes témoin (BSD).

Bien que certains auteurs ont observé une réduction de la résistance à la compression du béton renforcé par des fibres métalliques (Rossi, 1994 ; Rossi, 1998 ; Boulekbache et al., 2010) par rapport à un béton sans fibres, sauf une orientation préférentielle, beaucoup d'entre eux ont constaté par contre une amélioration de la résistance à la compression.

Giaccio et Zerbino (2005) avaient observé une augmentation de la résistance à la compression de près de 20% en raison de la présence des fibres. En outre, Yang et al. (2007) ont constatés que les fibres introduites à différents pourcentages dispersées dans le béton augmentent la résistance à la compression. Quant à Luo et al. (2001), ils ont observés une augmentation importante de 61% de la résistance à la compression de la matrice renforcée de fibres par rapport à celle sans fibres. L'étude de Köksal et al. (2008), montre que les forces de compression des bétons produites par l'addition de fibres en acier et fumées de silice sont plus élevées que celles contenant uniquement de la fumée de silice.

Bentalha et Houari (2007) et Bentalha (2007) ont signalé qu'un ajout de fibres dans le béton améliore la résistance à la compression, cette amélioration peut atteindre jusqu'à 20%.

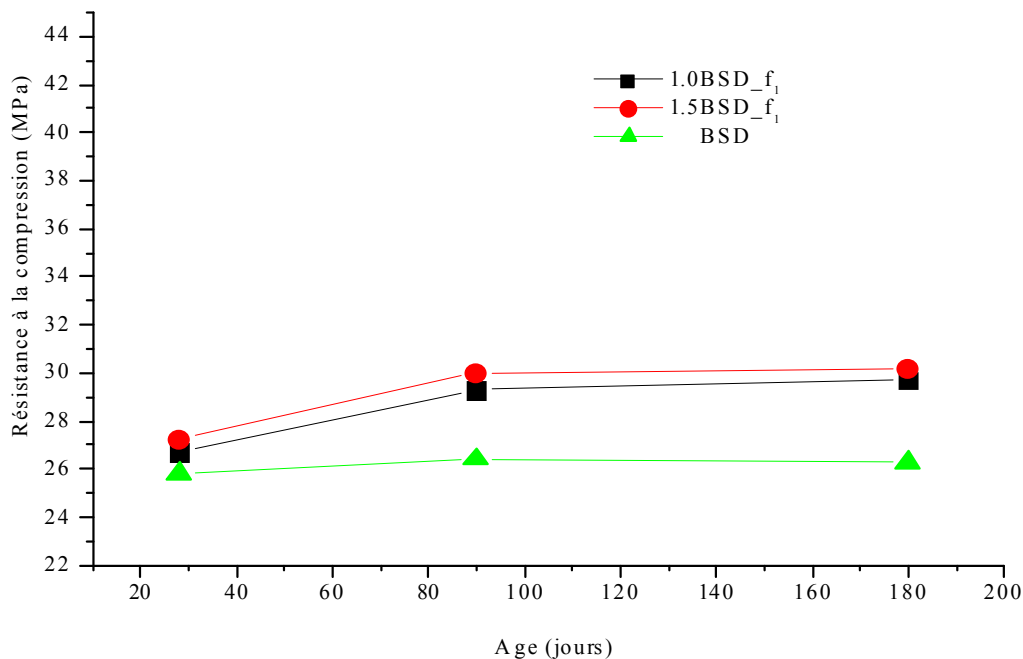


Figure IV.7 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1).

La figure IV.7 montre une augmentation de la résistance à la compression du mélange BSD_f₁, par rapport au béton témoin, allant de 11 à 13%, pour les dosages en fibres respectifs de 1.0 et 1.5% à 180 jours. Cette augmentation est due à la présence des fibres avec une orientation

préférentielle à l'intérieur de la matrice, ayant comme conséquence une augmentation de la résistance à la compression. D'un autre côté, il a été remarqué que la résistance à la compression pour la mixture 1.5BSD_ f_1 est supérieure par rapport à celle de 1.0BSD_ f_1 de 2,0%. Confirmant ainsi que l'accroissement de la teneur en fibres f_1 améliore légèrement la résistance à la compression.

Pour les fibres f_2 , une augmentation relativement importante de la résistance à la compression pour les BSD_ f_2 par rapport au BSD à 180 jours a été remarquée (Figure IV.8), d'environ 22% et 28% respectivement pour les mixtures 1.0BSD_ f_2 et 1.5BSD_ f_2 . Cette augmentation est due au fait que, la longueur des fibres f_2 est largement supérieure à la largeur du moule (40 x 40 x 160 mm). De ce fait, les fibres ont tendance à s'orienter dans le sens de la longueur des éprouvettes du béton. Par conséquent, au moment de l'écrasement de ces dernières la charge appliquée sera perpendiculaire aux fibres, réduisant ainsi la propagation de la fissuration, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la compression.

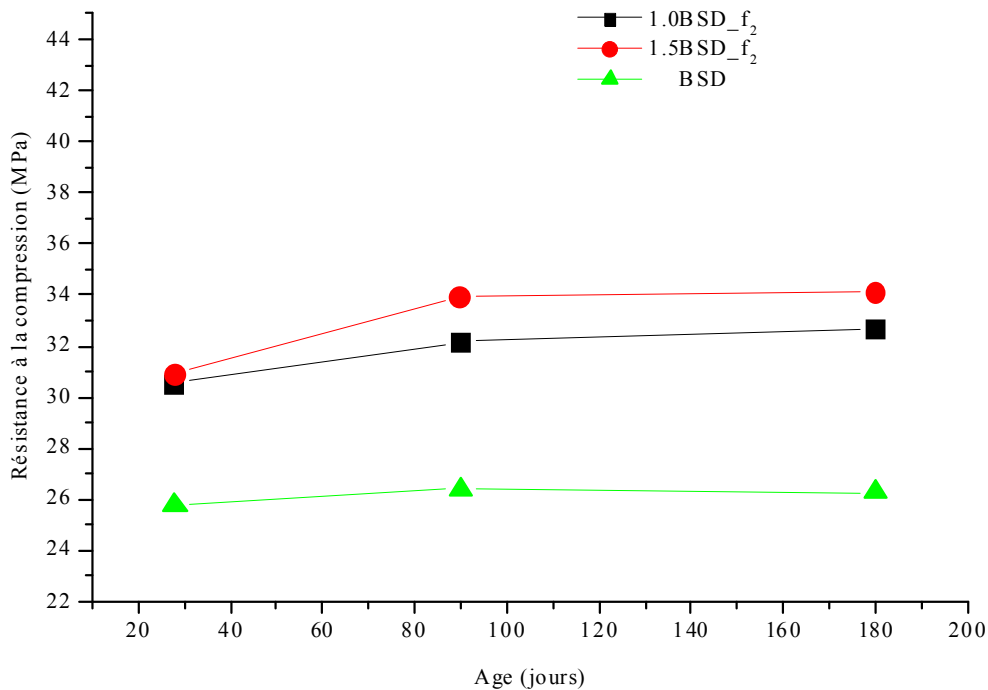


Figure IV.8 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_2).

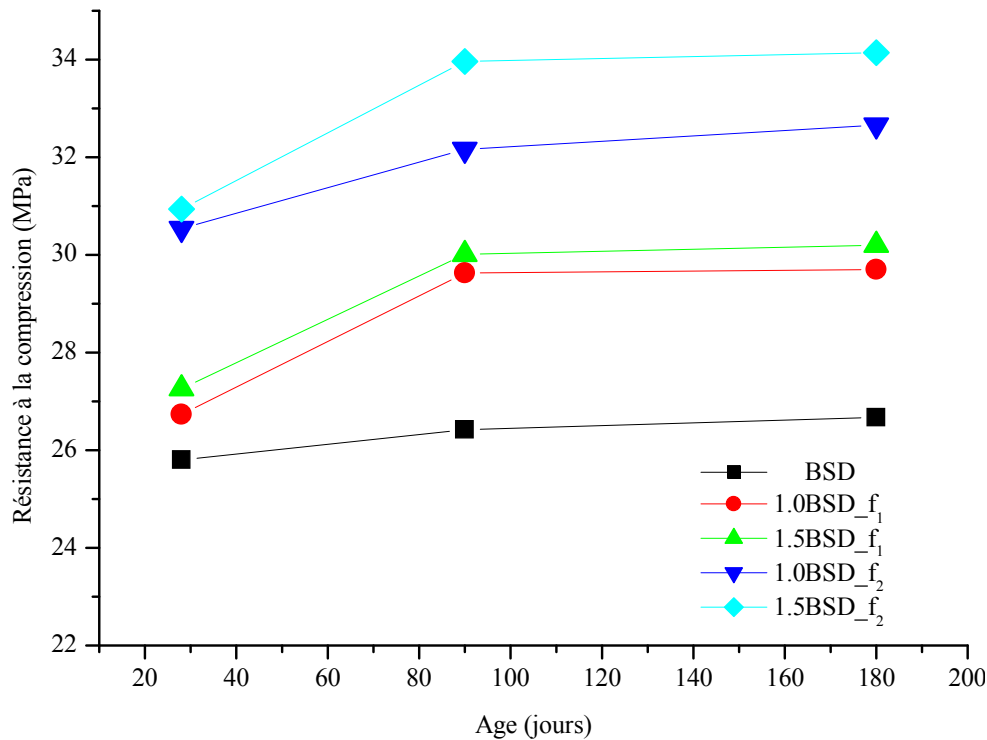


Figure IV.9 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibres f_1 et f_2).

Identiquement, que les mélanges réalisés avec l'introduction des fibres f_1 , les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression du mélange 1.5BSD_2 est supérieure à celle de 1.0BSD_2 d'environ 6%. En effet, l'influence du pourcentage en fibres est plus importante pour la fibre f_2 que pour la fibre f_1 . Ce résultat est dû essentiellement à l'influence à la fois de la longueur et du nombre de fibres orientées suivant le sens préférentiel, se traduisant par une résistance à la compression plus élevée du béton renforcé par les fibres f_2 par rapport au béton renforcé par les fibres f_1 (Figure IV.9).

Dans le même contexte Hamidi et Koohdaragh (2011), ont conclu qu'en comparant la moyenne de la résistance à la compression affectée par l'utilisation des fibres dans différentes directions, que l'utilisation de la fibre d'acier perpendiculaire à la direction de la force provoque une augmentation de la résistance à la compression du béton, mais l'utilisation de la fibre d'acier suivant la direction de la force n'avait pas d'effet remarquable sur la résistance du béton. D'un autre côté, il est bien connu que l'une des propriétés importantes du béton renforcé de fibres en acier est sa résistance à la fissuration (Holschemacher et al., 2010).

Selon Giaccio et Zerbino (2005), sous l'effet de la charge de compression uni-axiale, d'importantes fissures sont produites en béton pendant l'étape finale du régime avant pic. La présence des fibres dans la matrice freine la propagation des fissures.

Dans leur étude Neves et de Almeida (2005), attestent que le renforcement du béton par des fibres peut fonctionner à la fois au niveau micro et macro. Au niveau micro, les fibres peuvent stopper le développement de microfissures, conduisant ainsi à des forces de compression plus élevées, alors qu'au niveau macro les fibres contrôlent l'ouverture des fissures, augmentant ainsi la capacité d'absorption de l'énergie du composite.

Pour les mélanges des bétons réalisés avec l'incorporation des fibres f_3 , la figure IV.10 montre une augmentation importante de la résistance à la compression du BSD_ f_3 par rapport au béton sans fibres à 180 jours, d'environ 37% pour la mixture 1.0BSD_ f_3 et 55% pour la mixture 1.5 BSD_ f_3 . La valeur maximale de la résistance à la compression des bétons de sable de dunes renforcés de fibres (BSD_f) est enregistré pour le mélange ayant un dosage en fibres f_3 de 1.5% (1.5BSD_ f_3) par rapport à l'ensemble des BSD_f préparés avec l'incorporation des fibres f_1 et f_2 .

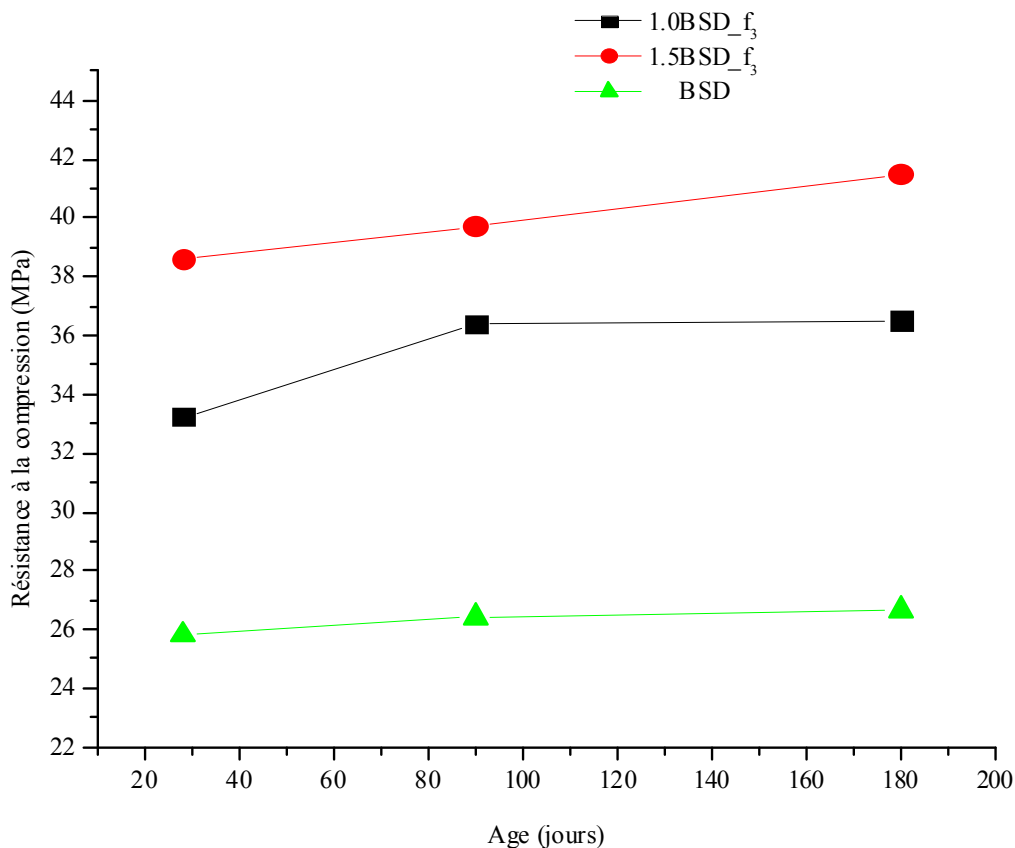


Figure IV.10 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_3).

Cette augmentation aussi significative est due vraisemblablement à l'excellente liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, ainsi qu'à leurs nombres élevés, du fait de leurs faibles

diamètres, conduisant à la création d'un réseau plus dense et solidaire. Stoppant ainsi le développement et la propagation des microfissures et empêchant l'apparition des macro-fissures.

D'après l'ensemble des résultats trouvés, il est plus que clair dans ce travail, que la quantité de fibres se traduisant par le pourcentage d'incorporation des fibres dans les bétons, joue un rôle positif dans l'amélioration de la résistance à la compression. La figure IV.11 présente une influence distinctement visible du pourcentage de fibres sur l'ensemble des mixtures, où nous remarquons qu'il y a effectivement une amélioration plus importante de la résistance à la compression des bétons réalisés avec un taux d'introduction de fibres de 1.5% par rapport à ceux réalisés avec un pourcentage de 1.0%.

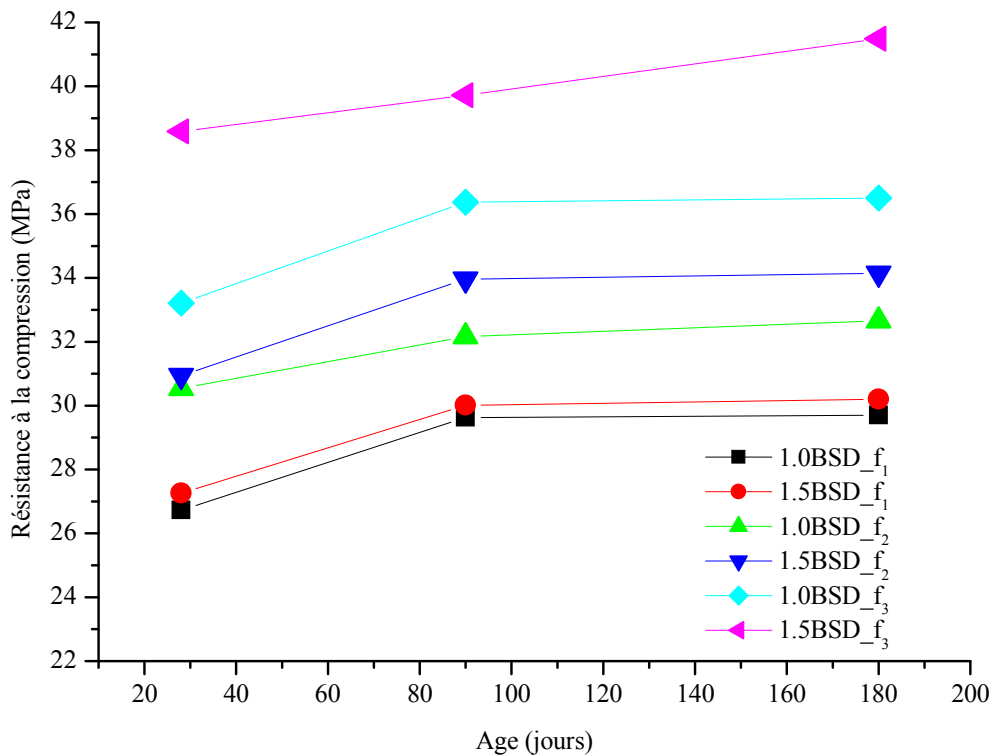


Figure IV.11 : Résistance à la compression en fonction d'âge (fibre f_1 , f_2 et f_3).

Néanmoins, nous distinguons que le mélange réalisé avec un dosage de 1% en fibres f_3 , montre une amélioration de la résistance à la compression plus importante par rapport à ceux effectués avec un dosage de 1.5% en fibres f_1 et f_2 . Ceci est expliqué comme nous l'avons déjà mentionné précédemment à leurs faibles diamètres, se traduisant notamment par un nombre important de fibres du type f_3 à un dosage de 1% par rapport à ceux de f_1 et f_2 avec un dosage de 1.5%.

Dans le même contexte, Neves et de Almeida (2005) témoignent qu'un plus grand nombre de fibres dans la matrice, entraîne une probabilité plus élevée que la microfissure sera interceptée par une fibre.

Même chose Holschemacher et al. (2010), indiquent que la force augmente à mesure que la teneur en fibres est élevée. Et que la résistance à la compression pour tous les échantillons de béton renforcé de fibres en acier à haute résistance a été plus élevée que celui sans fibres.

Selon une étude expérimentale réalisée par Aït-Tahar (2001), à travers laquelle il indique que la résistance à la compression est peu influencée par la présence de fibres ; pour un pourcentage de fibres $V_f = 1\%$, l'augmentation de la résistance à la compression est de l'ordre de 21,7%, pour un volume en fibres $V_f = 2\%$, une augmentation de 39% est observée et pour $V_f = 3\%$, un accroissement de l'ordre de 52% est obtenu, par rapport au béton témoin. A notre avis ces résultats montrent qu'il y a effectivement une amélioration de la résistance à la compression du béton fibré par rapport au témoin chaque fois qu'il y a une augmentation du dosage en fibres.

Selon une synthèse sur plusieurs études menées avec le centre d'études du bâtiment et des travaux publics (CEBTP) en France, Absi (1994), a signalé que les chercheurs ont constaté que le comportement du béton fibré en compression diffère du béton sans fibres selon le type et le volume de fibres. D'autres chercheurs ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'introduction de fibres métalliques dans le béton (tests effectués sur des éprouvettes cylindriques $\varnothing 16 \times H 32 \text{cm}$).

IV.2.3.1.2. L'effet de l'élanement (l/d)

Les figures IV.12 et IV.13 montrent l'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression à 28, 90 et 180 jours des bétons renforcés de fibres métalliques issues de pneus usés avec les dosages en fibres de 1.0 et 1.5%. Suivant les résultats obtenus on remarque qu'il y a une proportionnalité évidente entre l'amélioration de la résistance à la compression et l'augmentation du rapport l/d . L'introduction des fibres (f_1 , f_2 et f_3) ayant respectivement les élanements $\lambda_1 = 33,33$; $\lambda_2 = 66,66$ et $\lambda_3 = 142,86$ dans le béton, montrent que la résistance à la compression augmente à mesure que le rapport l/d devient plus élevé, cette augmentation est observée pour les différents âges (28, 90 et 180 jours).

Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Köksal et al., (2008). Où ces derniers affirment que les valeurs de la résistance à la compression des bétons ayant un élanement égal à 80, ont été supérieures à celles des bétons avec un élanement égal à 65, avec la même quantité de fibres d'acier et fumée de silice.

Neves et de Almeida (2005), ont rapporté que l'incorporation des fibres ayant une longueur de 30 mm, un diamètre de 0,38 mm et un élanement de 80, améliore la résistance à la compression du composite de plus de 9%, un autre type de fibres avec une longueur de 30 mm, un diamètre de 0,55 mm et un élanement de 55, réduit la résistance à la compression du composite de 20%. Ceci montre l'influence de l'élanement sur l'amélioration de la résistance à la compression, plus le rapport l/d augmente plus la résistance à la compression devienne importante.

Dans le même contexte Marar et al. (2011) attestent que l'augmentation maximale de la résistance à la compression est de 33,7% obtenue par un béton renforcé par des fibres d'acier, ayant un rapport l/d de 83 et un taux de dosage en fibres de 2.0%, par rapport au béton témoin. Pour les mélanges avec les rapports l/d de 60 et 75, l'augmentation maximale de la résistance à la compression est de 24,3 et 28,2%, respectivement obtenues avec un dosage en fibres de 2.0%, par rapport au béton témoin.

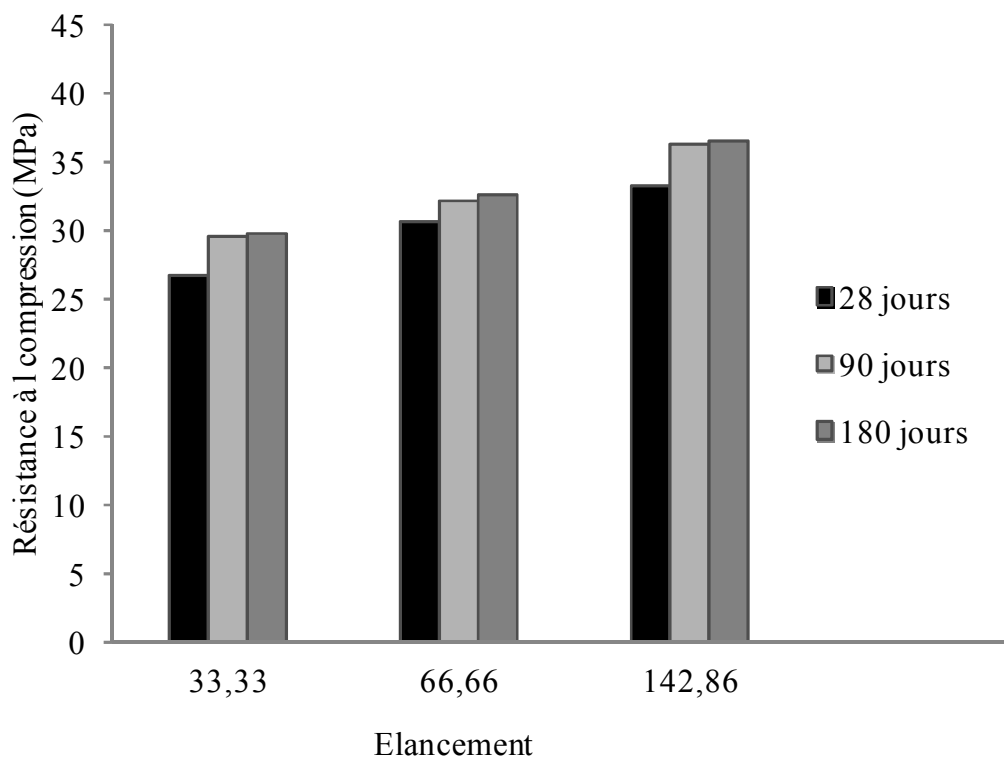


Figure IV.12 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$).

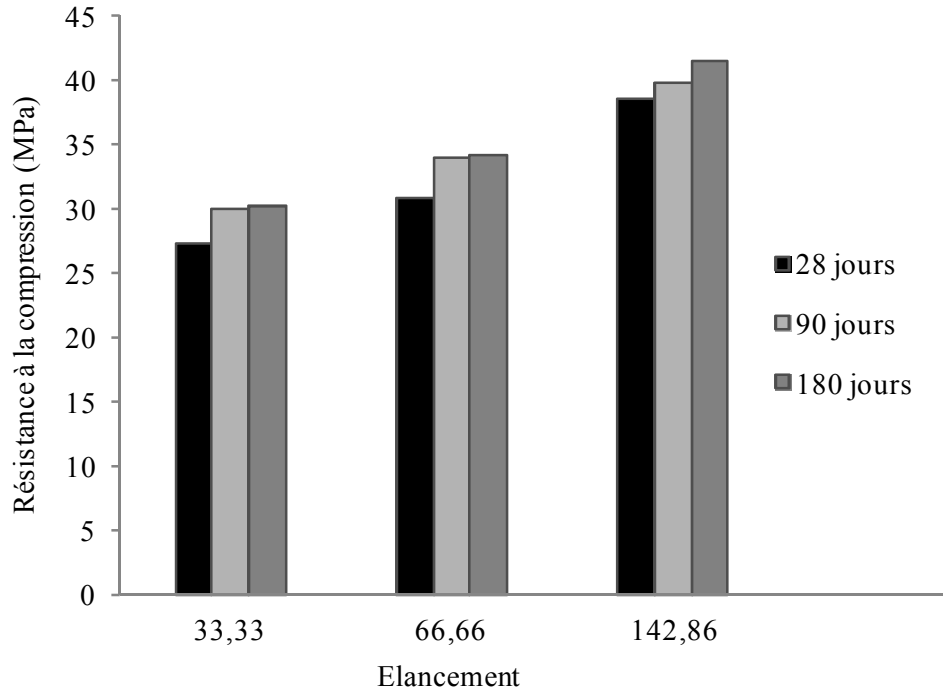


Figure IV.13 : L'effet de l'élanement (l/d) sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$).

IV.2.3.1.3. L'effet de la rigidité des fibres

Les figures IV.14 et IV.15 présentent l'influence du module d'élasticité des fibres utilisées sur la résistance à la compression des bétons de sable de dunes. Une amélioration de cette dernière a été observée avec l'augmentation du module d'élasticité. L'introduction dans le béton des fibres f_3 ayant le module d'élasticité le plus élevé (Tableau IV.2) affiche les meilleurs résultats de la résistance à la compression par rapport à l'ensemble des bétons de sable de dunes expérimentés.

En effet, la rigidité des fibres contribue à l'amélioration de la résistance à la compression du béton. Cependant, malgré le fait que les fibres f_1 et f_2 ont le même module d'élasticité, l'introduction de la fibre f_2 dans le béton donne une résistance à la compression supérieure à celle de l'incorporation de la fibre f_1 , cela est due certainement à l'influence de la longueur des fibres f_2 , qui est plus importante par rapport aux fibres f_1 ($l(f_2) = 2l(f_1)$). En conséquence, les dimensions et plus particulièrement la longueur dans ce cas l'emportent sur l'effet du module d'élasticité.

Dans le même contexte Neves et de Almeida (2005) indiquent que, si la fibre est assez rigide et bien adhérente à la matrice, c'est à ce moment qu'elle peut empêcher le développement des microfissures.

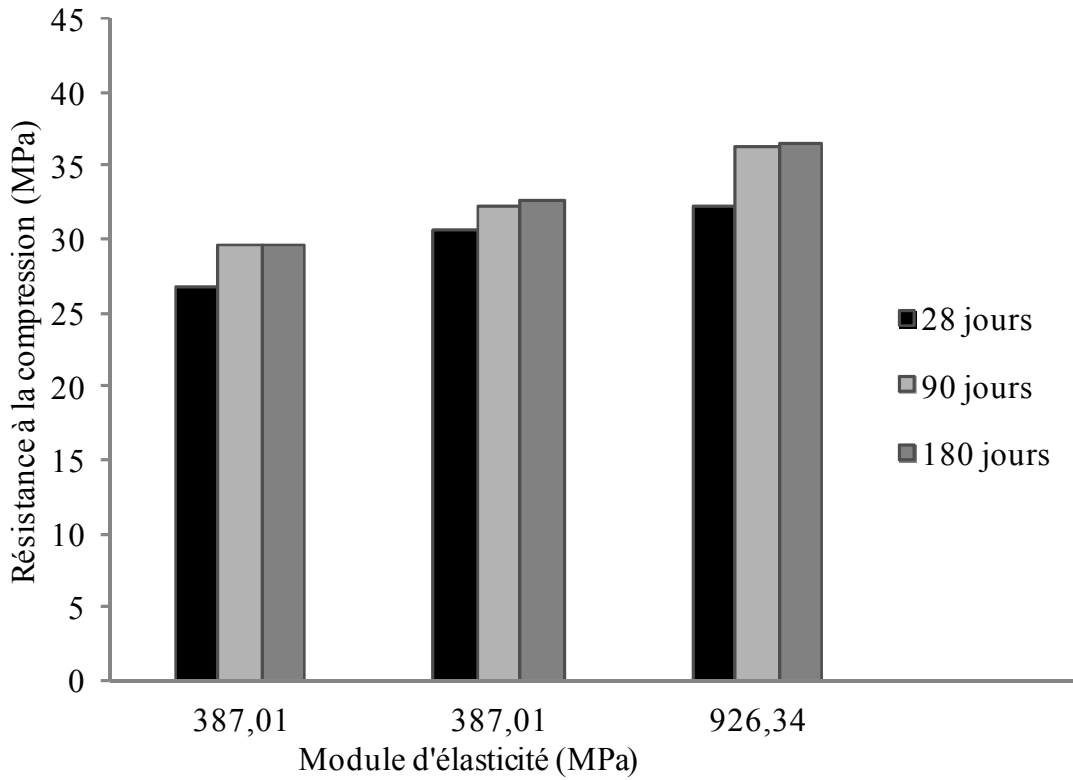


Figure IV.14 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.0\%$).

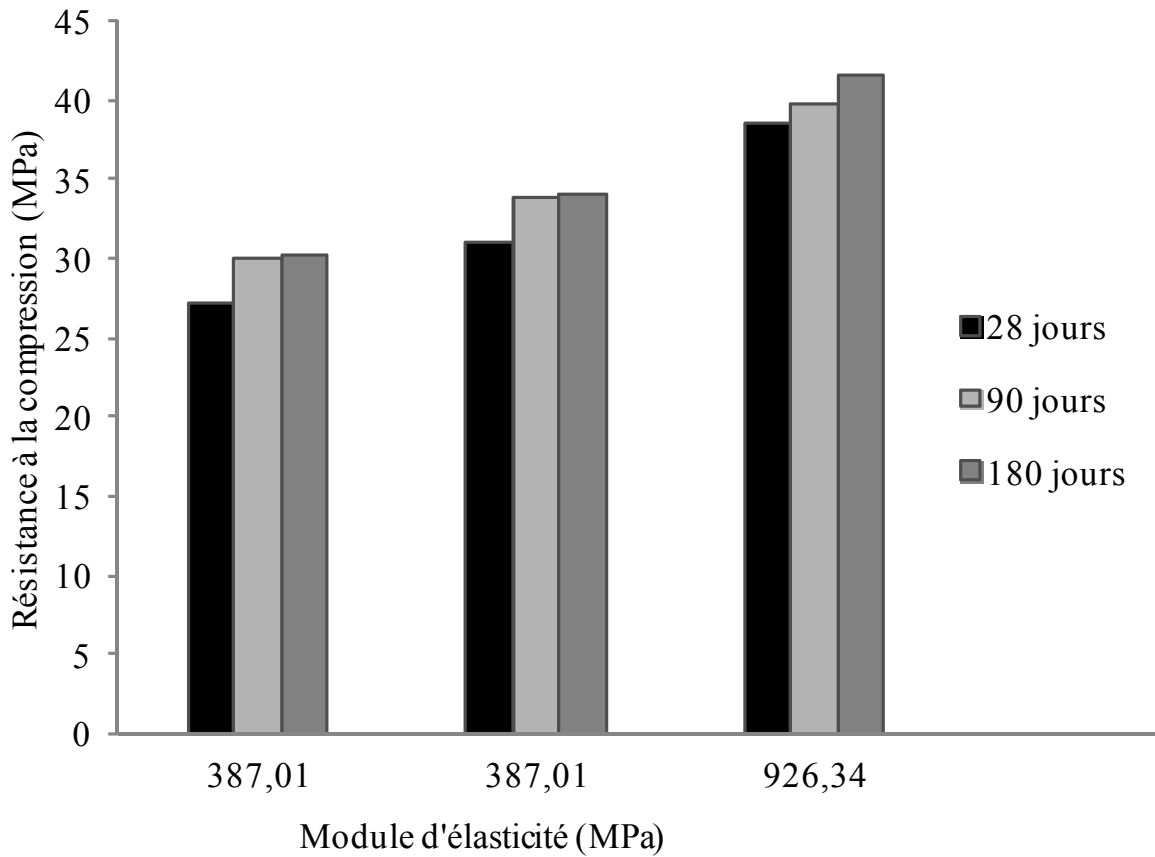


Figure IV.15 : L'effet de la rigidité sur la résistance à la compression ($V_f = 1.5\%$).

Dans le même ordre d'idées, de Rivaz (2006) atteste que, le module de Young des fibres régit le mode de défaillance après observation des fissures. Même chose pour Rossi (2009) qui confirme, que lorsque le module de Young des fibres augmente les fissures créées diminuent.

Dans leur étude Hsie et al. (2008), ont conclu que le béton renforcé de fibres de polypropylène hybride présente la meilleure augmentation de la résistance à la compression. La raison est que la fibre monofilament a le module d'élasticité élevé et une rigidité de la forme à l'état brute.

IV.2.3.2. Résistance à la flexion

Les figures IV.16, IV.17 et IV.19 montrent qu'il y a manifestement une amélioration de la résistance à la flexion des bétons de sable de dunes renforcés de fibres métalliques issues des pneus usés par rapport au béton témoin. Cette résistance à la flexion est en corrélation avec plusieurs paramètres parmi lesquelles nous trouvons :

- Le pourcentage et la longueur des fibres métalliques ;
- Le rapport longueur/diamètre (l/d) ;
- La rigidité des fibres.

IV.2.3.2.1. L'effet du pourcentage et de la longueur des fibres métalliques

Les figures IV.16 et IV.17 présentent l'effet de l'introduction des fibres métalliques f_1 et f_2 sur l'amélioration de la résistance à la flexion des bétons de sable de dunes renforcés de fibres par rapport au béton témoin. Les résultats trouvés montrent une amélioration de la résistance à la flexion du BSD_ f_1 à l'âge de 180 jours de l'ordre de 8,86% et 9,75% avec les dosages en fibres respectifs de 1 et 1.5%. Quant aux bétons renforcés par les fibres f_2 (BSD_ f_2) une amélioration de l'ordre de 16,69% et 20,83% a été observée dans les mêmes conditions d'âge et de dosages.

Dans ce cas de figure l'ajout des fibres f_1 et f_2 ayant le même diamètre mais de longueurs respectives de 30 et 60 mm, peuvent faire l'objet d'une comparaison sous l'unique influence de la longueur sur la résistance à la flexion des bétons de sable de dunes. Cela s'explique peut être par le fait que les fibres longues développent une résistance à l'arrachement plus importante comparativement aux fibres courtes, ce qui se traduit par une amélioration conséquente de la résistance à la flexion des bétons de sable renforcés par des fibres f_2 par rapport à ceux renforcés par des fibres f_1 .

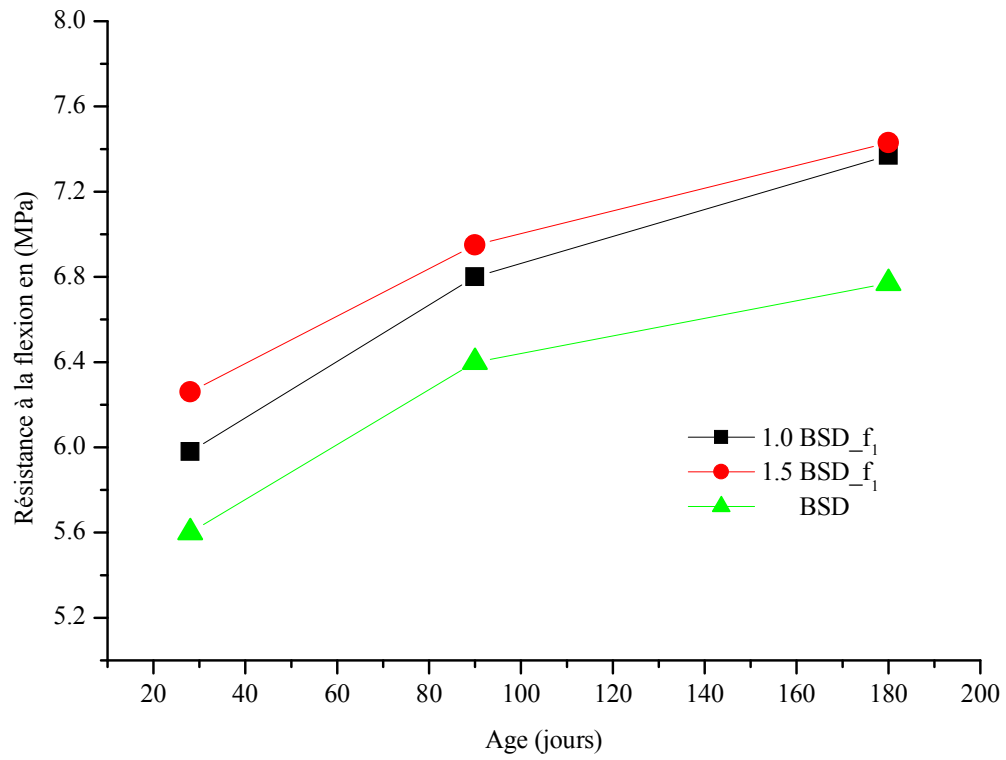


Figure IV.16 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f₁).

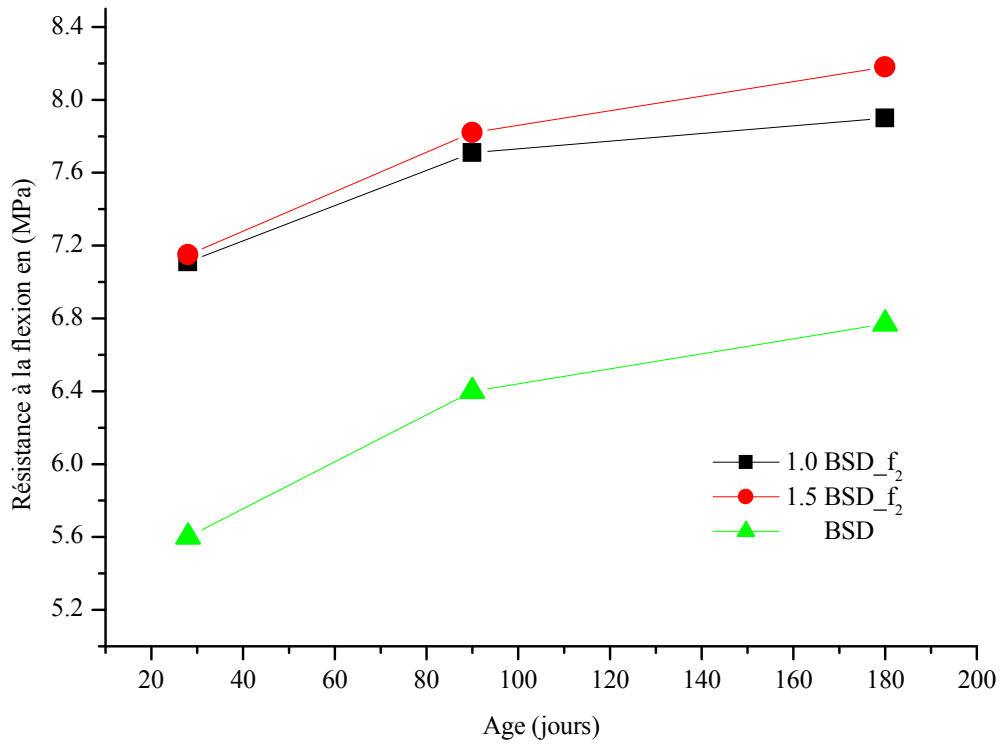


Figure IV.17 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f₂).

La figure IV.18 montre distinctement que l'introduction des fibres f_2 dans le béton, présentent les meilleurs résultats de la résistance à la flexion, allant jusqu'au double par rapport aux bétons renforcés par les fibres f_1 . Cela prouve que lorsque la longueur des fibres augmente les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées, ceci est dû essentiellement à l'accroissement de l'effort d'ancrage des fibres de longueur $l_f = 60$ mm au sein de la matrice cimentaire et aussi à leurs orientations privilégiées (les fibres se positionnent parallèlement à la longueur de l'éprouvette) causer par les effets de parois dues aux dimensions des moules.

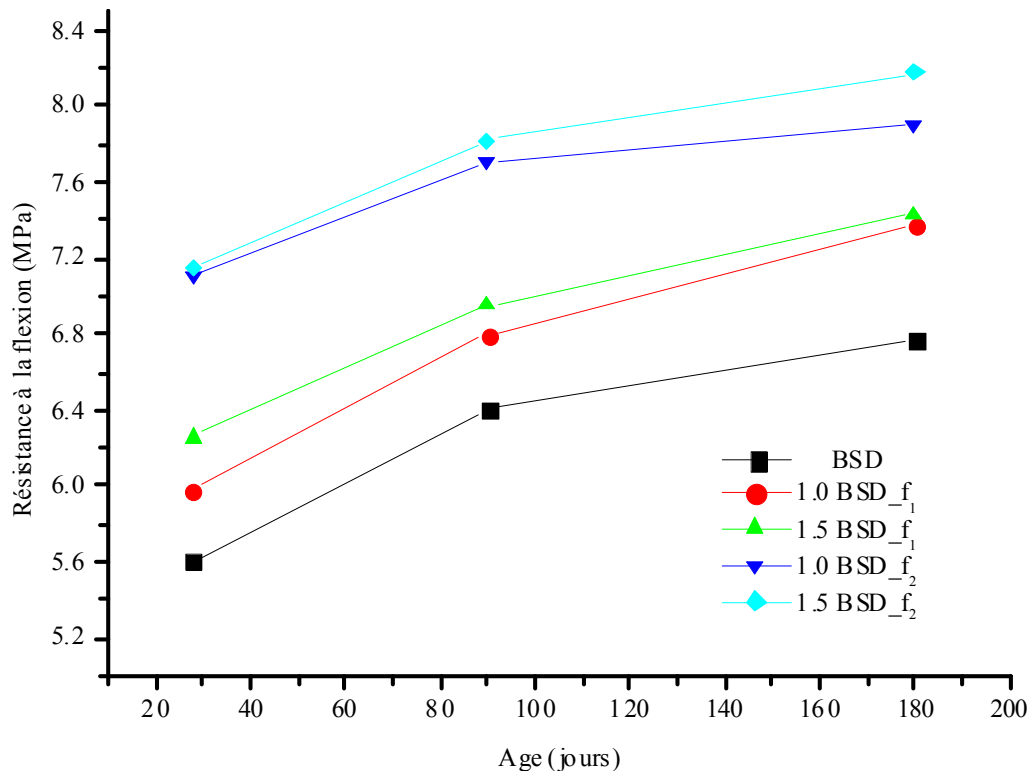


Figure IV.18 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibres f_1 et f_2).

Dans le même ordre de concept Marar et al. (2011), témoignent qu'une augmentation maximale de la résistance à la flexion de 100% et de l'indice de ténacité à la flexion, ont été obtenues à des taux en fibres élevés, et avec des pourcentages plus élevés de fibres plus longues au sein des mélanges.

La figure IV.19 présente quant à elle les résultats de la résistance à la flexion du BSD et BSD_ f_3 , où nous avons pu observer une amélioration de la résistance à la flexion des bétons renforcés de fibres par rapport au béton témoin à l'âge de 180 jours, de l'ordre de 24,52% et 29,1% respectivement pour les dosages en fibres de 1.0 et 1.5%.

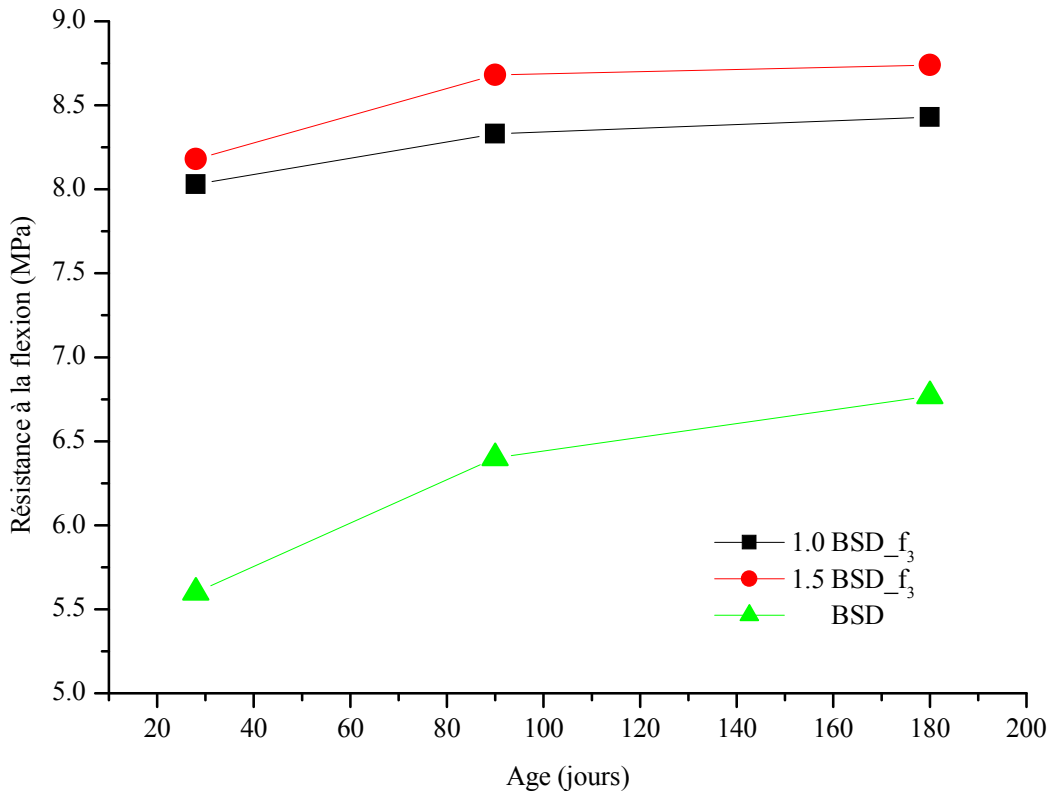


Figure IV.19 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (fibre f_3).

À travers l'ensemble de ces résultats, on peut constater que la résistance à la flexion obtenue par la mixture BSD_f₃ est la meilleure par rapport à celles obtenues par les mixtures BSD_f₁ et BSD_f₂. Cette augmentation de la résistance à la flexion est liée vraisemblablement au nombre plus important de fibres au sein de la matrice. Ceci est dû au diamètre faible des fibres f_3 , formant ainsi un réseau beaucoup plus important que celui formé par l'incorporation des fibres f_1 et f_2 ; favorisant la présence de plusieurs fibres autour des fissures augmentant ainsi la probabilité d'existence de fibres constituant des ponts ou des liaisons entre les lèvres des fissure, arrêtant ainsi la propagation des microfissures, qui se traduit par une augmentation de la résistance à la flexion (Figure IV.20, photos IV.1 et IV.2).

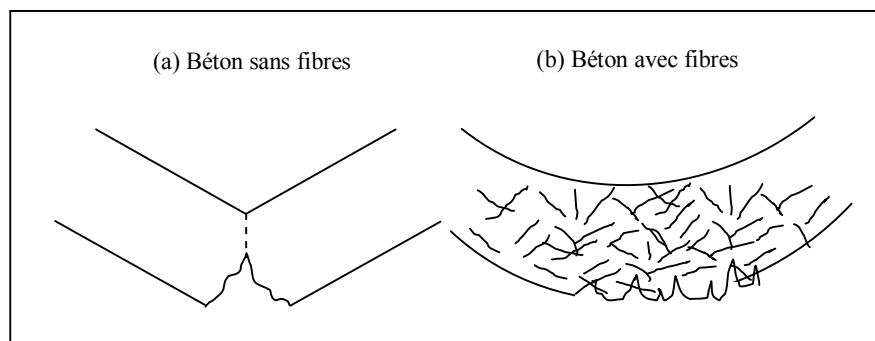


Figure IV.20 : Comportement du béton à la rupture.

Quant à l'influence du taux de fibres incorporées dans la matrice cimentaire (Figure IV.21), nous remarquons d'après les résultats obtenus pour les BSD_f₁, BSD_f₂ et BSD_f₃ qu'il y a une augmentation de la résistance à la flexion entre les dosages en fibres de 1.0 et 1.5% de l'ordre respectif de 0,88% pour BSD_f₁, 4,14% pour BSD_f₂ et 4,58% BSD_f₃.

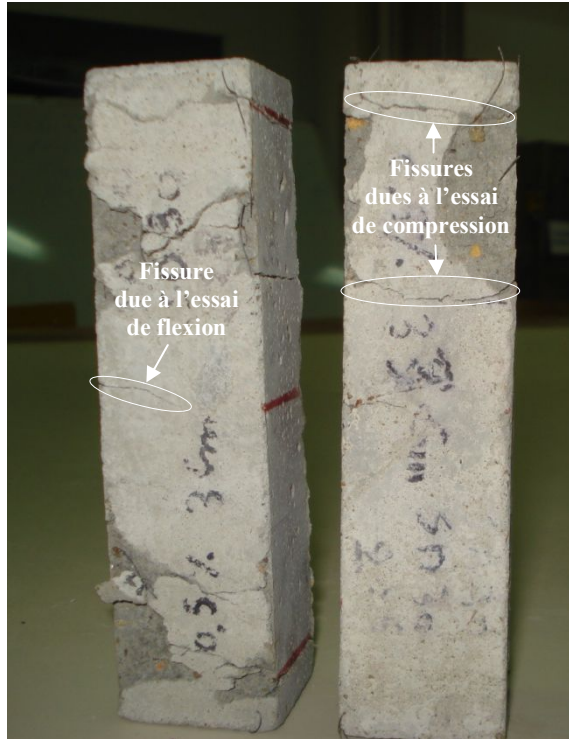


Photo IV.1 : L'état des éprouvettes après écrasement en flexion et compression.



Photo IV.2 : Eprouvette après écrasement, montrant le pontage des fissures par des fibres métalliques issues de pneus usés.

Également la figure IV.21 montre une augmentation de la résistance à la flexion du BSD_{f₂} par rapport à BSD_{f₁} et du BSD_{f₃} par rapport à BSD_{f₁} et BSD_{f₂} à un dosage en fibres de 1% respectivement de l'ordre de 7,83% ; 15,66% et 7,83%. Aussi une augmentation de la résistance à la flexion des mêmes combinaisons de mixtures citées précédemment, mais cette fois-ci pour un dosage en fibres de 1.5% de l'ordre respectif de 11,08% ; 19,35% ; 8,27%. Ces accroissements en résistance sont dus plus particulièrement aux caractéristiques géométriques des fibres qu'à leur dosage.

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence du taux d'incorporation des fibres dans les bétons, parmi lesquelles Dawood et Ramli (2012) qui indiquent dans leur étude que les résultats de la résistance à la flexion des mélanges de mortier montrent que l'augmentation de la résistance à la flexion est compatible avec l'augmentation des taux de fibres d'acier. Aussi ces derniers ont conclu que la résistance à la flexion des mélanges contenant des fibres d'acier augmente avec l'augmentation du dosage en fibres. Les valeurs les plus élevées de cette propriété ont été obtenues lorsque 1,75% de fibres d'acier ont été incorporées dans le mélange.

Aussi Gencil et al. (2011), dans leur étude affirment que la résistance à la flexion est affectée de manière significative par les fibres. En comparaison avec le béton ordinaire, l'amélioration de la résistance à la flexion des bétons renforcés par les fibres est de l'ordre de 13,1%, 24,2%, 40,6% et 51,7% pour les mélanges ayant respectivement les dosage en fibres de 0.2%, 0.4%, 0.6% et 0.8%. Ainsi, la valeur la plus élevée correspond à la plus haute teneur en fibres.

Dans le même contexte Pawade et al. (2011), ont observés que l'augmentation de la résistance à la flexion est directement proportionnelle à la teneur en fibres, et également une diminution de la déformation à la flexion avec l'augmentation de ces dernières par rapport au béton normal.

Luo et al. (2001), ont conclu qu'avec l'augmentation du dosage en fibres les propriétés mécaniques (compression et flexion) de béton de haute performance renforcée de fibres d'acier ont été considérablement améliorées. Dans leur travail Yoo et al. (2015), confirment que la résistance à la flexion et la déflexion correspondante augmentent avec la teneur en fibres et la résistance à la compression.

Dans le même contexte Siddique et Kunal (2016), dans leur étude ont trouvé que l'augmentation de la résistance à la flexion pour les bétons ayant un dosage en fibres de 0.5%, 1.0% et 1.5% était respectivement de l'ordre de 14,1%, 29,5% et 32,9%, comparativement au

béton témoins (sans fibres). D'après ces derniers la résistance à la flexion augmente en raison d'un rendement supérieur des bétons fibrés. Cette amélioration est due à la liaison fibre-matrice de mortier obtenue par l'utilisation de fibres en acier à extrémités crochues.

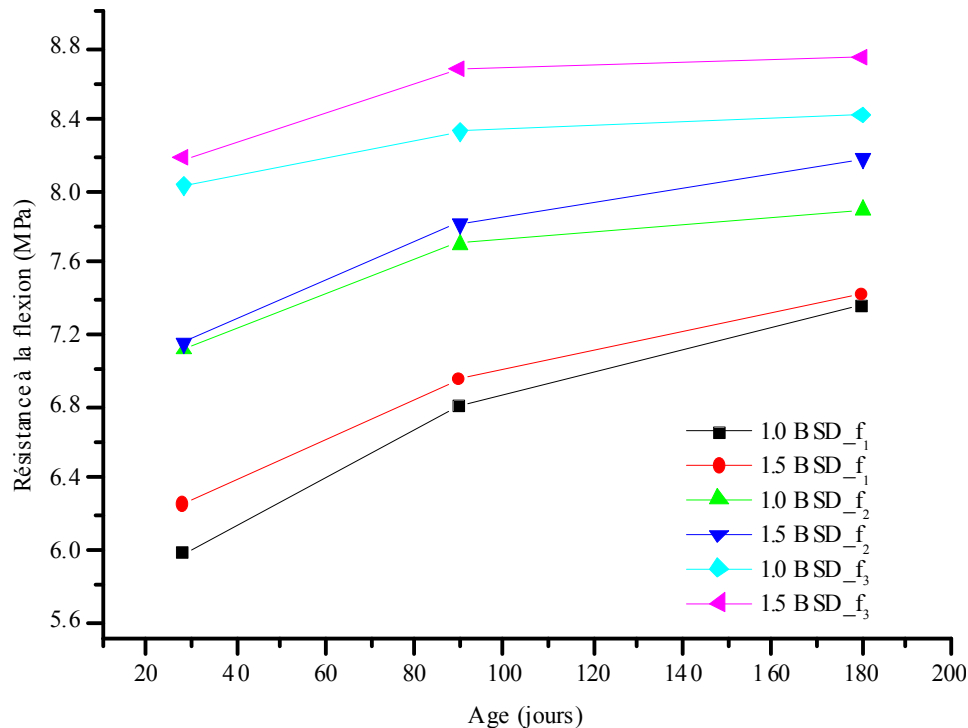


Figure IV.21 : Résistance à la flexion en fonction d'âge (effet du dosage en fibre f_1 , f_2 et f_3).

IV.2.3.2.2. L'effet de l'élançement (l/d)

Les figures IV.22 et IV.23 montrent l'influence du rapport l/d sur l'amélioration de la résistance à la flexion des BSD_f à l'âge de 28, 90 et 180 jours avec des dosages en fibres de 1.0 et 1.5%. On remarque qu'il y a une relation entre l'amélioration de la résistance à la flexion et l'augmentation de l'élançement ; En effet, les résultats obtenus par l'ajout des f_1 , f_2 et f_3 ayant respectivement les élançements $\lambda_1 = 33,33$; $\lambda_2 = 66,66$ et $\lambda_3 = 142,86$ témoignent de l'importance du rapport l/d sur la résistance à la flexion du BSD_f. En conséquence plus l'élançement est élevé plus la résistance à la flexion est importante.

Dans le même concept Köksal et al. (2008) attestent que pour les mêmes teneurs en fumées de silice, les résistances à la flexion des bétons de fibres ayant un élançement égal à 80 sont supérieures à celle des bétons de fibres avec un élançement égal à 65.

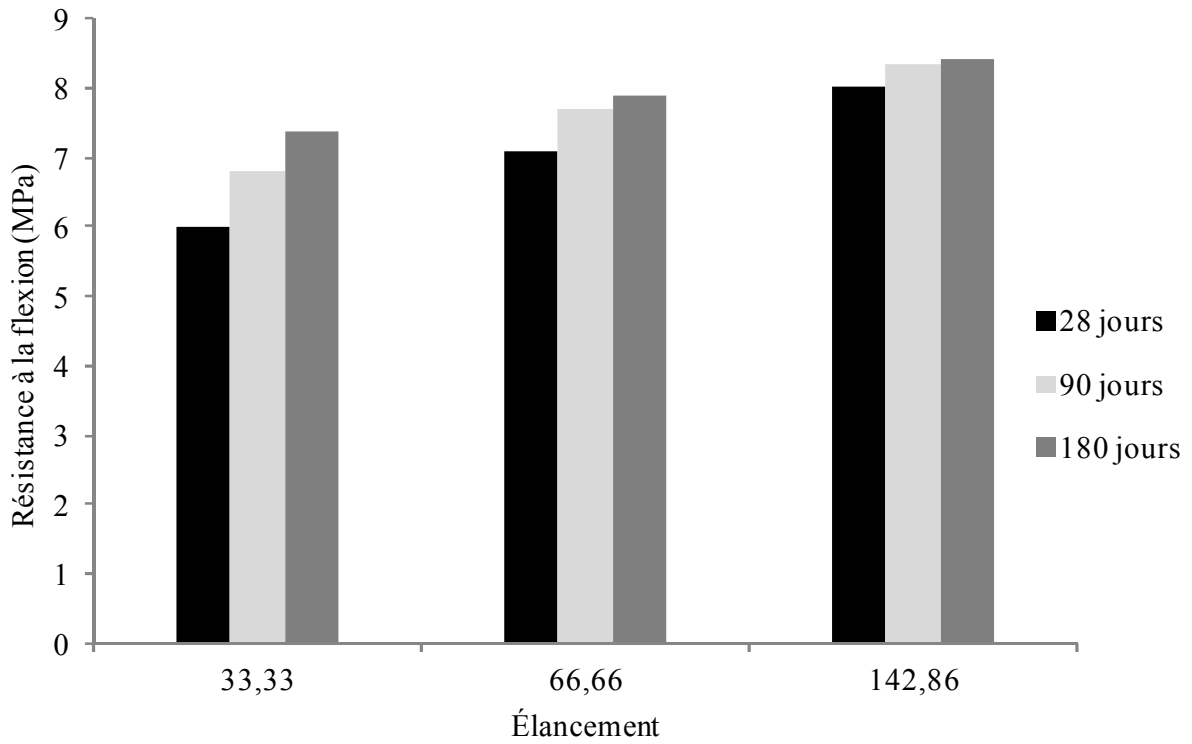


Figure IV. 22 : L'effet de l'élancement (l/d) sur la résistance à la flexion ($V_f=1.0\%$).

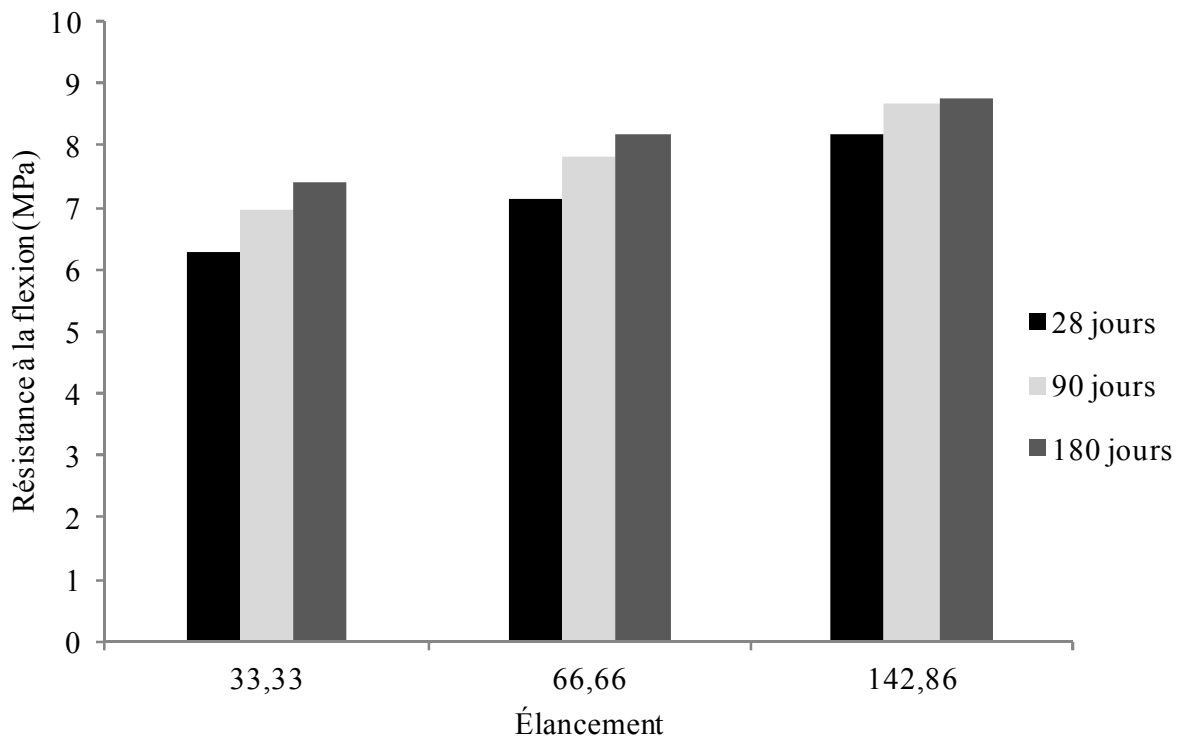


Figure IV. 23 : L'effet de l'élancement (l/d) sur la résistance à la flexion ($V_f=1.5\%$).

Egalement pour Vandewalle (2000) l'addition des fibres d'acier diminue à la fois l'espacement et la largeur des fissures. Une plus grande réduction respectivement de la largeur et l'espacement de la fissure, peut être remarqué que si les fibres d'acier avec un rapport l/d élevé sont utilisées. Même chose pour Van Chanh (2005) qui témoigne que l'augmentation de la résistance à la flexion est particulièrement sensible, non seulement au dosage en fibres, mais aussi à leurs élancements, où un rapport l/d élevé conduit à une augmentation plus importante de la résistance.

IV.2.3.2.3. L'effet de la rigidité des fibres

L'influence du module d'élasticité des fibres utilisées sur la matrice cimentaire est exprimé sur les figures IV.24 et IV.25. Ces dernières montrent qu'il y a effectivement une relation entre l'augmentation du module d'élasticité et celle de la résistance à la flexion. D'après les résultats obtenus, on remarque que les bétons réalisés avec l'ajout des fibres f_3 ayant un module d'élasticité plus important présentent une meilleure résistance à la flexion, par rapport aux bétons réalisés respectivement par l'ajout des fibres f_1 et f_2 ayant un module d'élasticité bien inférieure à celui de la fibre f_3 . Cette amélioration peut être expliquée probablement par le fait que ces fibres présentent une résistance à la traction plus importante, d'où une amélioration de la ductilité de la matrice cimentaire, ce qui se traduit par une résistance ayant comme effet l'empêchement de la parution précoce des microfissures.

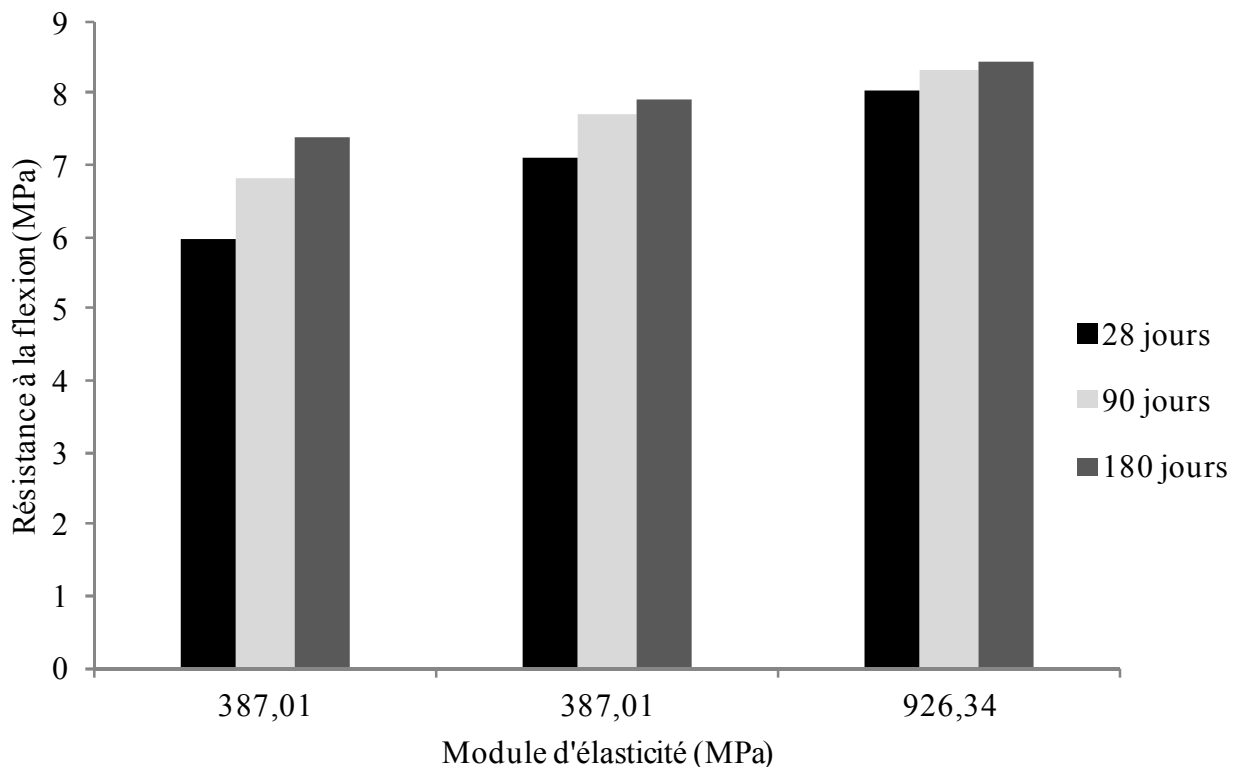


Figure IV. 24 : L'effet de la rigidité des fibres sur la résistance à la flexion ($V_f=1.0\%$)

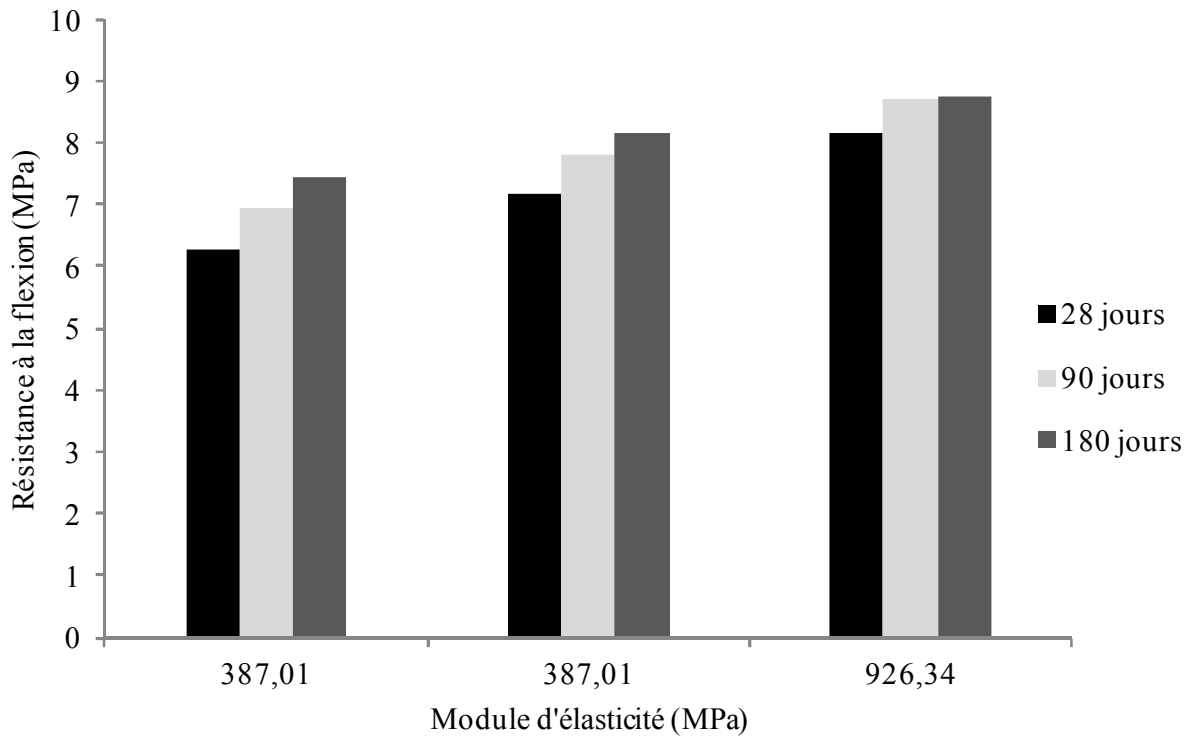


Figure IV. 25 : L'effet de la rigidité des fibres sur la résistance à la flexion ($V_f=1.5\%$).

Marar et al. (2011), ont remarqué qu'en général, la fissuration du béton commence à se manifester avant que la charge ultime soit atteinte ; qui peut être observée par la diminution de la pente de la partie ascendante de la courbe contrainte-déformation. Une fois la charge ultime est atteinte, les fissures internes commencent à s'interconnecter ; par conséquent, la rigidité globale de l'échantillon d'essai est réduite. La présence des fibres d'acier dans le béton avec une position perpendiculaire à la direction d'application de la charge peut conduire à une réduction des déformations latérales en raison de leur effet de rigidité, d'où l'augmentation de la ténacité du béton renforcé par des fibres d'acier.

Dans le même contexte, Holschemacher et al. (2010) ont conclu que l'utilisation des fibres à haute résistance, a entraînée un comportement ductile nettement meilleur et un niveau de charge plus élevé dans la gamme post-fissuration, par rapport à celles ayant une résistance normale.

IV.3. Etude des propriétés du béton de sable de dunes corrigé

Après avoir étudié les caractéristiques mécaniques des bétons de sable de dunes. Dans ce qui suit, on va aborder les propriétés physiques des matériaux utilisés, mécaniques et rhéologiques des bétons réalisés avec du sable de dunes ayant subi une correction de sa granulométrie par l'ajout d'un sable alluvionnaire.

IV.3.1. Propriétés des matériaux utilisés

Dans ce travail les propriétés des sables utilisés sont à la fois physiques, morphoscopie et minéralogiques. L'ensemble de ses propriétés nous permet d'avoir une caractérisation plus au moins fiable, qui nous serve au préalable dans le choix et la correction granulométrique.

IV.3.1.1. Propriétés physiques

La distribution granulométrique des différents sables utilisés à savoir : le sable de dunes (SD), le sable alluvionnaire (SA), le sable ayant une composition de 50% SD + 50% SA et un autre avec une composition de 40% SD + 60% SA est montrée sur la figure IV.27.

L'ensemble des résultats essentiels des caractéristiques physiques de ces sables, sont présentés dans le tableau IV.4, dans lequel le sable de dune présente un module de finesse de l'ordre de 1,00 indiquant qu'il s'agit d'un sable très fin. Quant à l'allure de la courbe granulométrique elle nous renseigne qu'il s'agit d'un sable ayant à la fois une granulométrie très serrée et discontinue en fin de courbe, avec des tailles de grains comprises entre 0,08 et 0,315 mm. Elle montre également que la courbe du sable de dunes est non conforme du fait, qu'elle est située en dehors du fuseau de tolérance appelé fuseau de spécification du matériau recommandée par la norme AFNOR P 18-541 (Dreux et Fiesta, 1998).

Suite à ces résultats et des recommandations des études antérieures (Abu Seif, 2013b; Belferrag et al., 2013), une correction de la granulométrie du sable de dunes par un sable alluvionnaire ayant un module de finesse de 2,73 et une granulométrie continue et régulière comprise entre 0,08 et 5 mm a été adoptée. A cet effet, des essais ont été réalisés afin de déterminer les proportions nécessaires du sable de dunes et du sable alluvionnaire pour la confection du béton. Les résultats obtenus à travers ces essais nous ont permis d'adopter l'utilisation des proportions 50% SD + 50% SA et 40% SD + 60% SA, ayant respectivement les valeurs de modules de finesse 1,89 et 2,14. En effet, ces valeurs sont acceptables selon la norme P 18-541 (Dreux et Fiesta, 1998), qui indique que le module de finesse des sables rentrant dans la gamme des sables autorisés pour la confection des bétons doit être compris entre 1,8 et 3,2.

À propos de la propreté des sables utilisés, nous remarquons selon les résultats obtenus (Tableau IV.4), que le sable de dune à un équivalent de sable très propre ; absence ou presque de limon et d'argile comparativement au sable alluvionnaire. Toutefois, pour les sables obtenues des mélanges 50% SD + 50% SA et 40% SD + 60% SA une nette amélioration de l'équivalent de sable a été observée, par rapport à celui du 100% SA, donnant ainsi aux proportions des sables adoptées une qualité meilleure sur le plan propreté.

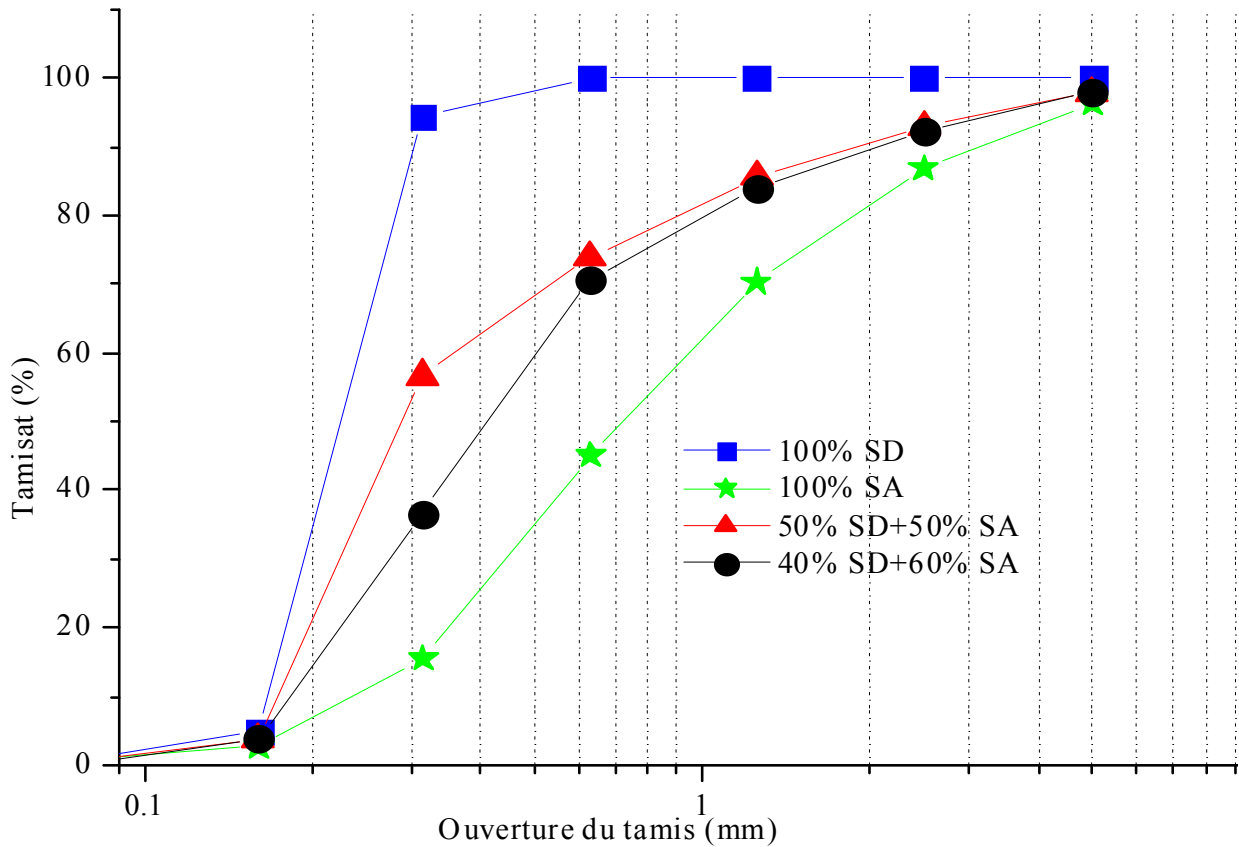


Figure IV.27 : Courbe granulométrique des sables utilisés.

Quant à la capacité d'absorption, nous remarquons d'après les résultats montrés sur le tableau IV.4, que les sables utilisés à savoir le sable de dunes et le sable alluvionnaire ont tous deux des capacités d'absorption acceptables. Puisque la norme XP P 18-540 préconise que le coefficient d'absorption A_b doit être inférieur à 6% pour les granulats destinés aux bétons hydrauliques.

Tableau IV.4 : Propriétés physiques des sables utilisés.

Sables	M. Volumique apparente (Kg/m ³)	M. Volumique absolue (Kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)	Equivalent de sable (%)	Module de Finesse (%)
SD	1346,0	2613,7	1,02	97,46	1,00
SA	1471,7	2510,5	0,60	60,87	2,73
50% SD+50% SA	1415,8	2560,5	-	72,53	1,89
40% SD +60% SA	1380,6	2545,7	-	67,05	2,14

IV.3.1.2. Etude morphoscopique

L'observation des grains du sable de dunes et du sable alluvionnaire (Figures IV.28.A et IV.28.B) à l'aide d'une loupe binoculaire a révélée leur forme arrondie et plus particulièrement l'absence d'impuretés pour le sable de dunes par rapport au sable alluvionnaire (Figure IV.28.C). Quand à la nature des grains de ses sables ils sont essentiellement composés de quartz.

Les grains du sable de dunes ont une forme régulière et une plus petite taille comparativement à ceux du sable alluvionnaire à un même grossissement (X20) (Figure IV.28.A et IV.28.B).

IV.3.1.3. L'analyse minéralogique (DRX)

Les analyses minéralogiques par diffractométrie au rayon X du sable de dunes et du sable alluvionnaire (Figures IV.29 et IV.30), montrent la nature essentiellement siliceuse du SD et du SA. Où le quartz présente le minéral principal, avec des traces de calcite, de feldspath et de minéraux argileux.

Selon Abu Seif (2013b), l'absence de fragments de roches carbonatées actives comme la dolomite ou la magnésite dans les agrégats fins signifient que les sables étudiés ont une composition chimiquement stables, capables de produire du mortier sans réaction alcali-granulats.

Les figures IV.29 et IV.30 montrent également l'absence de contaminants nocifs dans la composition minéralogique des SD et SA, qui selon Abu Seif, 2013b réagissent négativement lorsqu'ils sont utilisés dans la confection des mortiers.

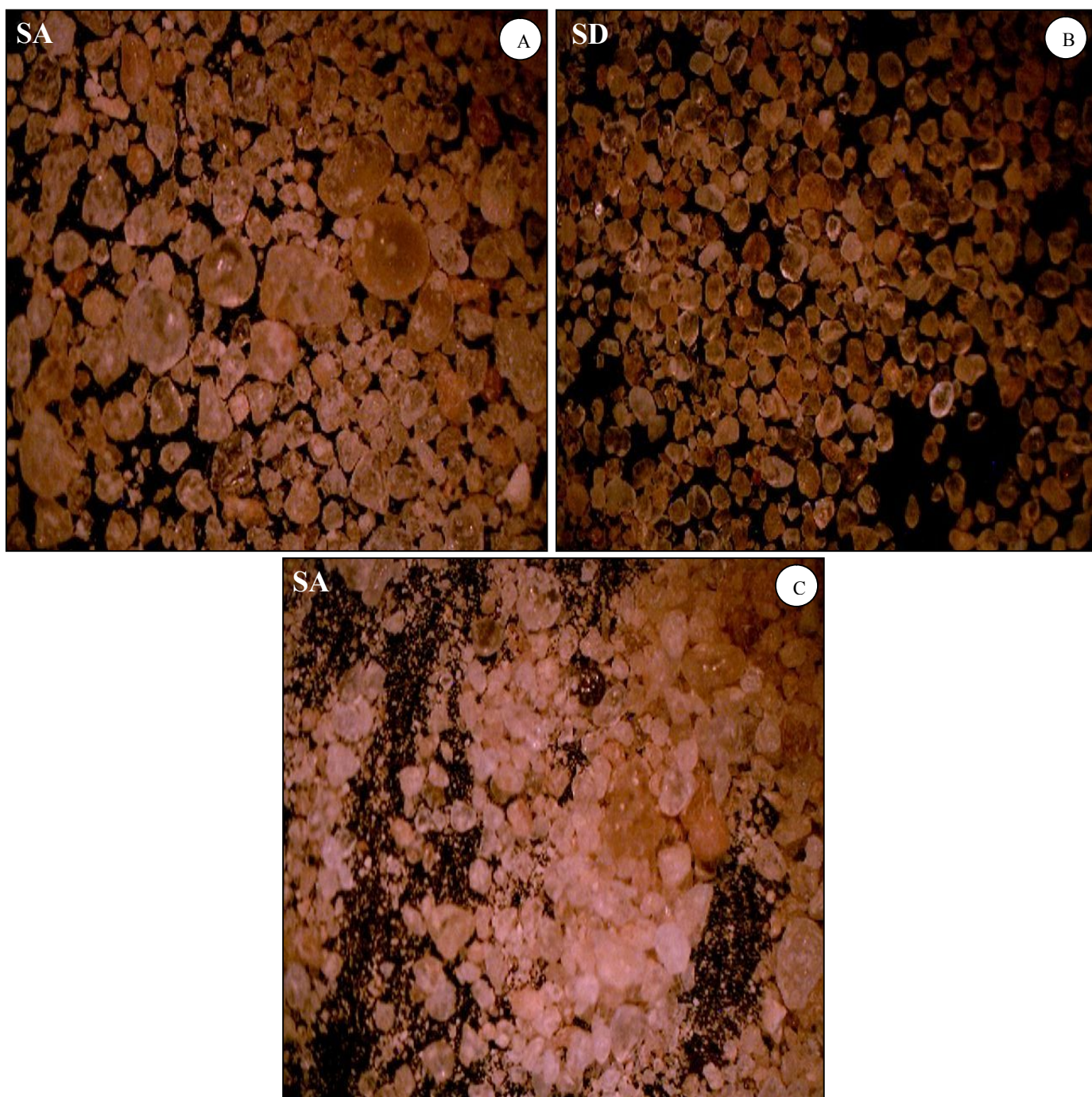


Figure IV.28 : Aspect général des grains du sable alluvionnaire (A) et du sable de dunes (B) (GX20). Sable alluvionnaire avec les impuretés (C) (GX15).

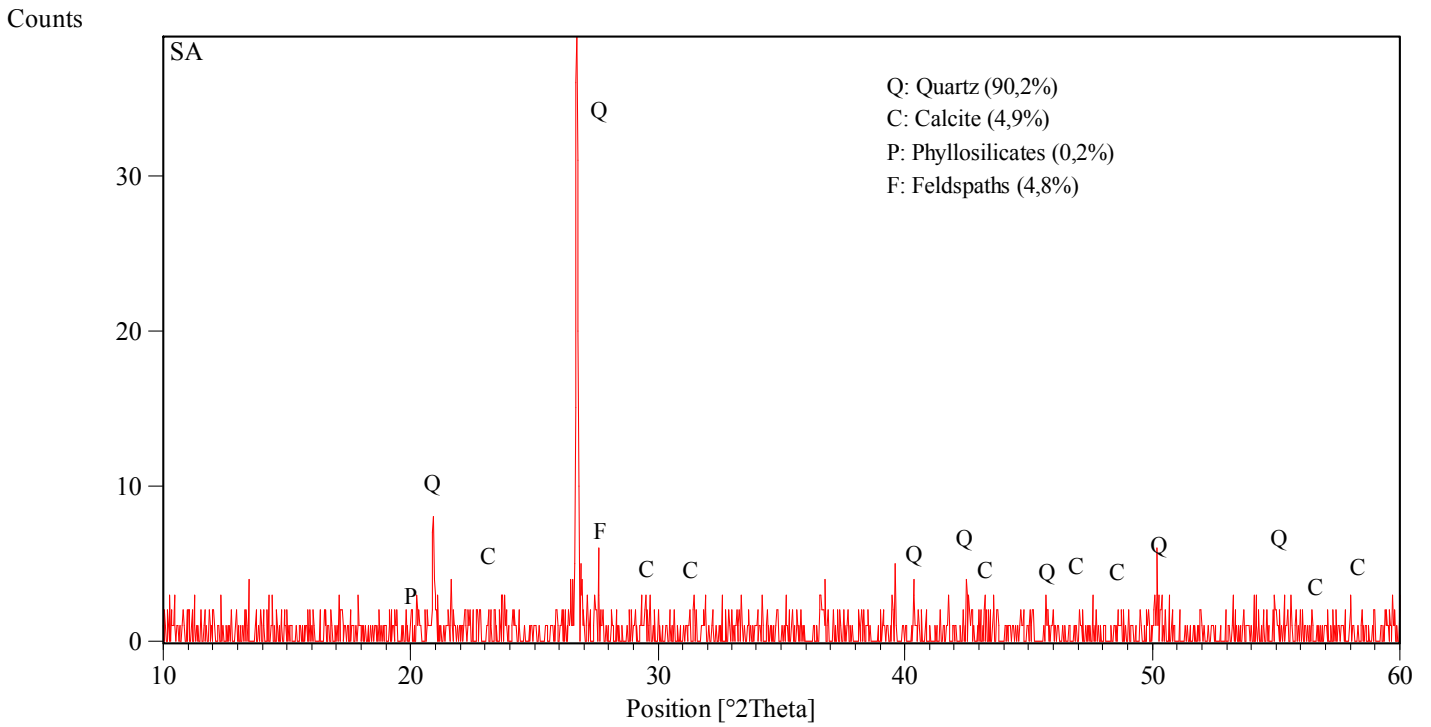


Figure IV.29 : Diffractogramme de rayons X du sable alluvionnaire.

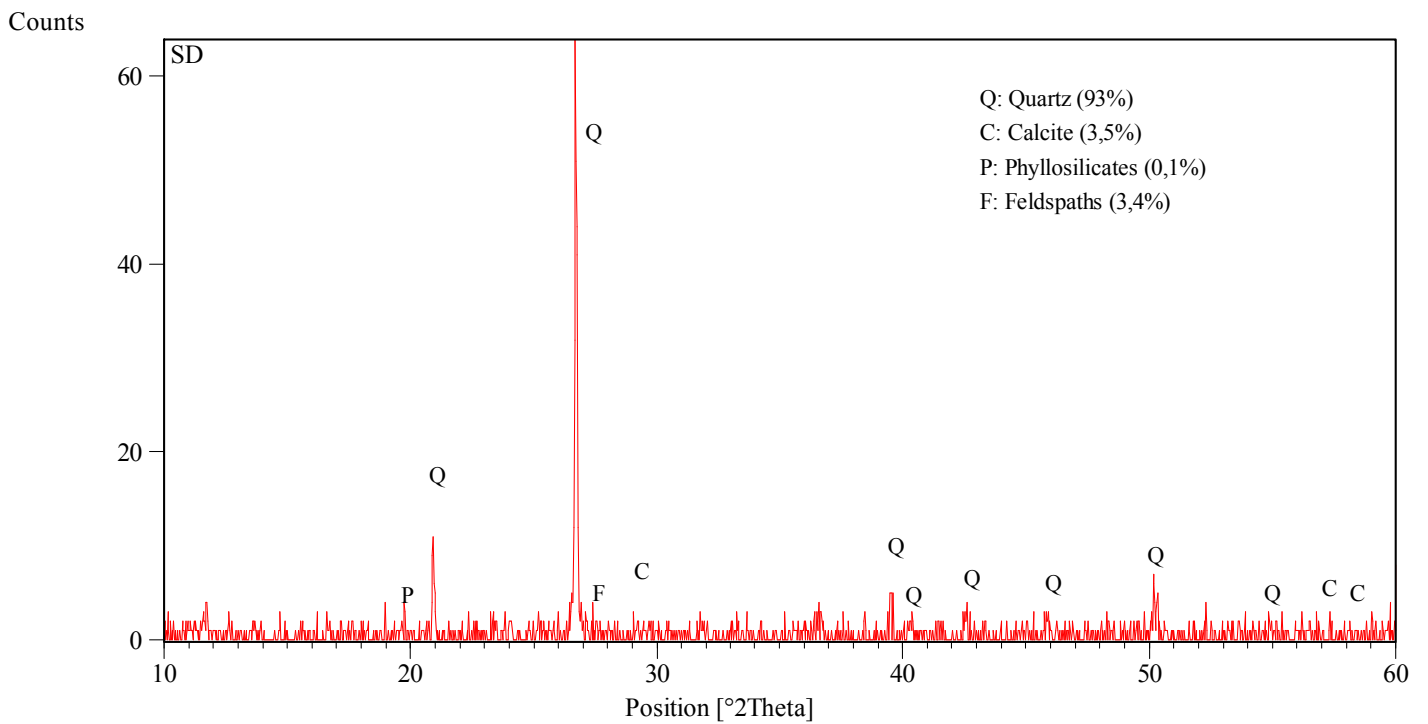


Figure IV.30 : Diffractogramme de rayons X du sable de dunes.

IV.3.2. Les propriétés du béton frais

La propriété essentielle du béton frais est sans doute son ouvrabilité, où cette dernière influe non seulement sur la capacité du béton à être mis en œuvre mais aussi sur ses propriétés à l'état durci. Il se trouve que l'ouvrabilité est gouvernée par plusieurs paramètres à savoir : le dosage en eau, la granulométrie, la forme et le type des granulats, la quantité et les caractéristiques des granulats et du liant, etc.

IV.3.2.1. Ouvrabilité

Dans cette partie la maniabilité a été mesurée à l'aide de l'essai Vébé et l'essai au maniabilimètre "B" suivant les normes respectives NF EN 12350-3 et NF P 18-452. Du fait que les mêmes résultats ont été obtenus par les deux tests, nous avons adopté ceux de l'essai Vébé. La norme NF EN 12350-3 préconise pour qu'un béton soit de consistance plastique, le temps d'écoulement doit être compris entre 20 et 30 secondes. Les résultats obtenus par l'essai Vébé, qui nous a servi pour la détermination de la quantité d'eau, montrent que le temps d'écoulement pour les bétons de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés, est plus élevé comparativement aux bétons de sable de dunes sans fibres. La figure IV.31, montre nettement que la maniabilité est affectée par la présence de fibres dans la matrice cimentaire et cela pour l'ensemble des mélanges. Par conséquent, la maniabilité des bétons diminue avec l'ajout des fibres, ce qui est en commun accord avec plusieurs études à savoir : Köksal et al., (2008), Gencel et al. (2011) et Belferrag et al. (2013).

En outre, la figure IV.31 montre l'influence du pourcentage du sable de dunes utilisé dans les mélanges à savoir : 40%, 50% et 100% sur la maniabilité des bétons. En effet, plus le pourcentage du sable de dunes dans le mélange est important plus le temps d'écoulement accroit ; c'est-à-dire qu'il y a une proportionnalité entre l'augmentation du pourcentage du sable de dunes et la diminution de l'ouvrabilité du béton. Cela peut s'expliquer par la faible valeur du module de finesse du sable de dunes.

Ceci est en conformité, avec les résultats obtenus par Al-Harthy (2007), confirmant que l'ouvrabilité du béton diminue avec des dosages en sable de dunes élevés (>50 %).

Dans le même contexte, Abu Seif (2013b) a signalé que la maniabilité du mortier de sable de dunes est acceptable, lorsque la proportion de ciment/sable n'est pas inférieure à 1:2 et que le contenu du sable de dunes ne dépasserait pas les 70 % par rapport au volume total des agrégats fins.

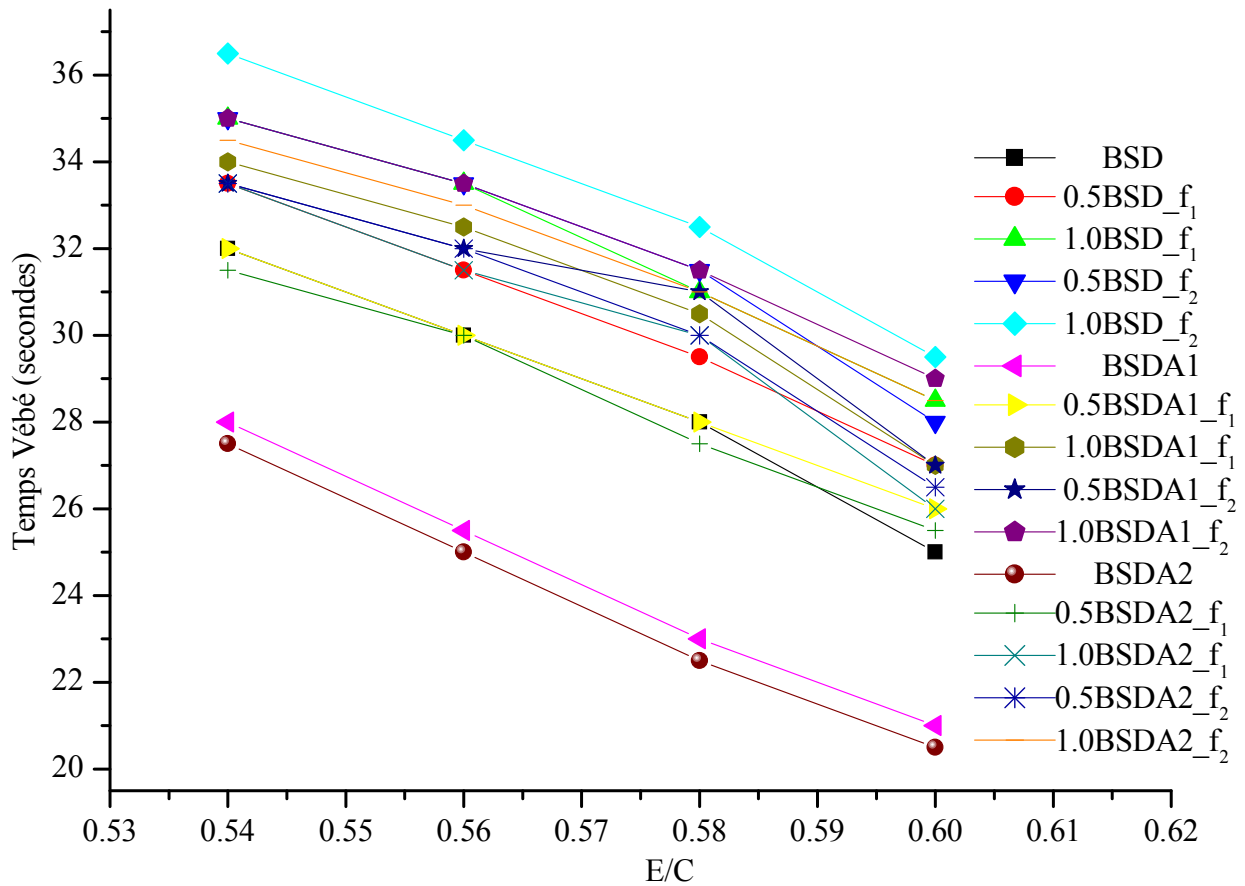


Figure IV.31 : Temps Vébé en fonction du rapport E/C des différents mélanges.

Afin de pouvoir évaluer le retrait tout en éliminant l'effet de l'eau entre les bétons témoins et les bétons avec fibres, le même rapport E/C égal à 0,60 a été maintenu pour les bétons du sable de dunes, avec ou sans fibres (BSD et BSD_f) et un rapport E/C égal à 0,58 pour l'ensemble des autres mélanges (BSDA1, BSDA1_f, BSDA2 et BSDA2_f) (Tableau III.8). En effet, une quantité plus importante d'eau a été utilisée pour les bétons réalisés à base du sable de dunes par rapport aux autres mélanges, ce surdosage en eau est dû en premier lieu à la granulométrie très fine du sable de dunes, et au second lieu à ses grains ayant une forme monométrique ; engendrant ainsi une augmentation de la surface spécifique, nécessitant une quantité d'eau importante pour avoir une bonne ouvrabilité.

Dans le même contexte Abu Seif 2013 (a), affirme que l'utilisation de sable très fin nécessite une quantité d'eau importante pour avoir une bonne maniabilité. Quant à Luo et al. (2013), ils suggèrent qu'il faut une certaine quantité d'eau de gâchage pour le béton à base de sable de dunes pour avoir une maniabilité comparable à celle du béton de sable alluvionnaire.

Luo et al. (2013), attestent aussi que le sable de dunes présente une surface spécifique nettement plus élevée que le sable alluvionnaire, ses particules absorbent donc une plus grande quantité d'eau. Dans le même ordre d'idées Bouziani et al. (2012), témoignent qu'un ajout excessif de particules fines peut entraîner une augmentation considérable de la surface spécifique, qui se traduit par une augmentation de la demande en eau pour l'obtention d'une consistance donnée.

IV.3.3. Propriétés mécaniques

IV.3.3.1. Résistance à la compression

Les résultats présentés sur la figure IV.32, confirment la contribution de la correction granulométrique du sable de dunes dans l'amélioration de la résistance à la compression. En effet, les bétons de sable de dunes formulés à l'aide du sable ayant les proportions de 50% SD + 50% SA (BSDA1) et celui avec les proportions de 40% SD + 60% SA (BSDA2) affichent une amélioration respectivement de l'ordre de 25,37% et 27,5%, par rapport au béton de sable de dunes (BSD) à 28 jours. Cette augmentation de la résistance à la compression est due à la fois à la correction granulométrique du sable de dunes et au rapport E/C qui est de l'ordre de 0,60 pour BSD et 0,58 pour les deux mixtures BSDA1 et BSDA2.

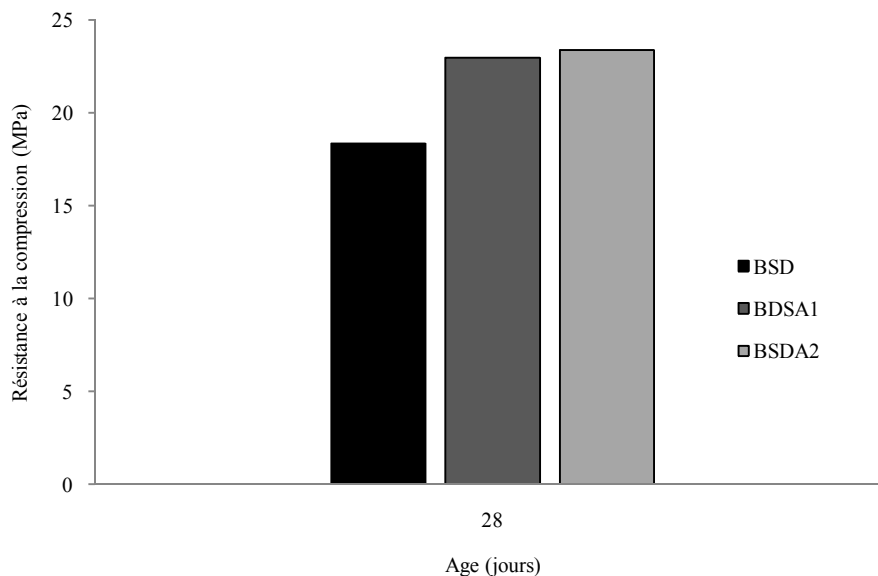


Figure IV. 32 : Résistance à la compression des bétons témoins en fonction d'âge.

Quant aux figures IV.33a, 33b et 33c, elles présentent les résultats de la résistance à la compression de l'ensemble des mélanges formulés avec 100% SD, 50% SD + 50% SA et 40% SD + 60% SA avec et sans fibres à 28 jours.

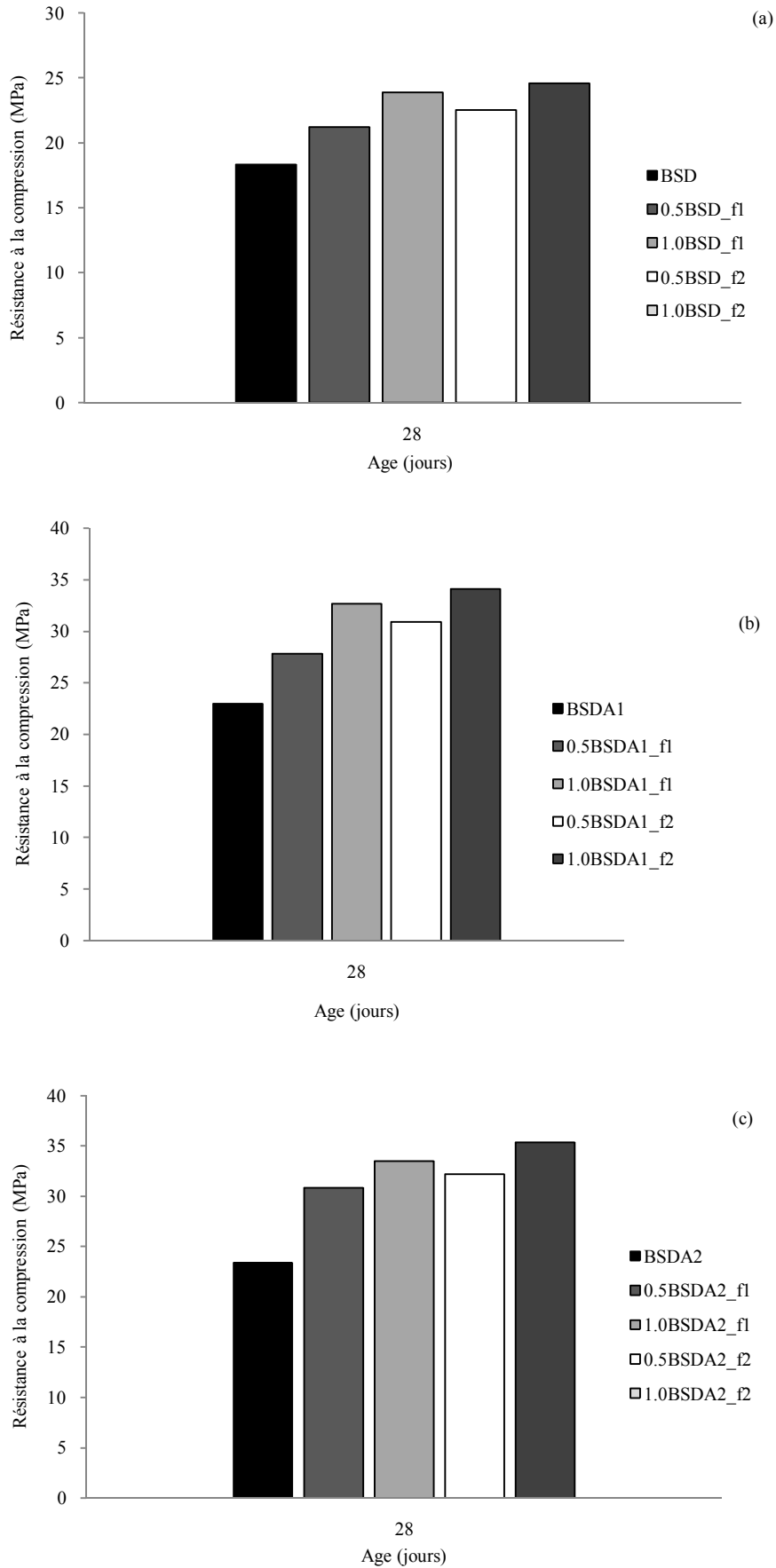


Figure IV.33 : Résistance à la compression du BSD, BSDA1 et BSDA2 avec et sans fibres en fonction d'âge.

Ces résultats indiquent qu'il y a une amélioration des bétons fibrés par rapport au béton sans fibres. La figure IV.33a, montre qu'il y a effectivement un accroissement de la résistance à la compression des bétons 0.5BSD_f₁, 1.0BSD_f₁, 0.5BSD_f₂ et 1.0BSD_f₂ par rapport au BSD respectivement de l'ordre de 15,6% ; 30,28% ; 22,75% et 34,24%. Même chose, une augmentation de la résistance à la compression des bétons 0.5BSDA1_f₁, 1.0BSDA1_f₁, 0.5BSDA1_f₂ et 1.0BSDA1_f₂ par rapport au BSDA1 respectivement de l'ordre de 20,98% ; 42,2% ; 34,46% et 48,39% a été observée (Figure IV.33b). Aussi une amélioration du même genre a été obtenue cette fois-ci pour les bétons 0.5BSDA2_f₁, 1.0BSDA2_f₁, 0.5BSDA2_f₂ et 1.0BSDA2_f₂ par rapport au béton témoin de l'ordre de 31,88% ; 43,34% ; 37,82% et 51,3% (Figure IV.33c).

Les meilleurs résultats sont obtenus par les bétons BSDA2 avec et sans fibres. Ces augmentations sont dues certainement à l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes. Néanmoins, nous distinguons nettement que les résultats obtenus suite à l'augmentation du pourcentage des fibres sont nettement mieux par rapport à ceux obtenus par l'influence de l'élanement est cela pour la totalité des mixtures.

La totalité des bétons de sable réalisés avec l'introduction des fibres à des dosages de 0.5% et 1.0% sont montrés sur les figures IV.34a et IV.34b. Où les mixtures fabriquées avec des fibres ayant l'élanement le plus élevé, présentent les meilleures résistances à la compression. De ce fait, les plus importantes augmentations sont obtenues par l'ajout des fibres f₂ ayant le rapport l/d le plus élevé de l'ordre de 107,14. Par l'incorporation de fibres f₂, l'amélioration de la résistance à la compression varie d'un mélange à l'autre, elle est de l'ordre de 22,75%, 68,58% et 75,74% respectivement pour les mixtures 0.5BSD_f₂, 0.5BSDA1_f₂ et 0.5BSDA2_f₂ et de 34,21%, 86,03% et 92,91% pour les mêmes mixtures mais à un dosage en fibres de 1.0% par rapport au béton témoin BSD.

Ces résultats montrent que la meilleure amélioration de la résistance à la compression est obtenue par la mixture 1.0BSDA2_f₂ de l'ordre de 92,91% par rapport au béton témoin (BSD). Cela peut s'expliquer à la fois par l'effet de la correction granulométrique et l'incorporation de la fibre f₂ caractérisée par la longueur et l'élanement les plus élevés. L'influence de la correction granulométrique est due généralement à la diminution de la surface spécifique ayant une influence directe sur la quantité d'eau de gâchage du mélange formulé avec 40% SD + 60% SA par rapport à celui du 100% SD.

Hormis l'influence de la correction granulométrique le reste des paramètres influant sur la résistance à la compression sont les mêmes que nous avons déjà discuté précédemment.

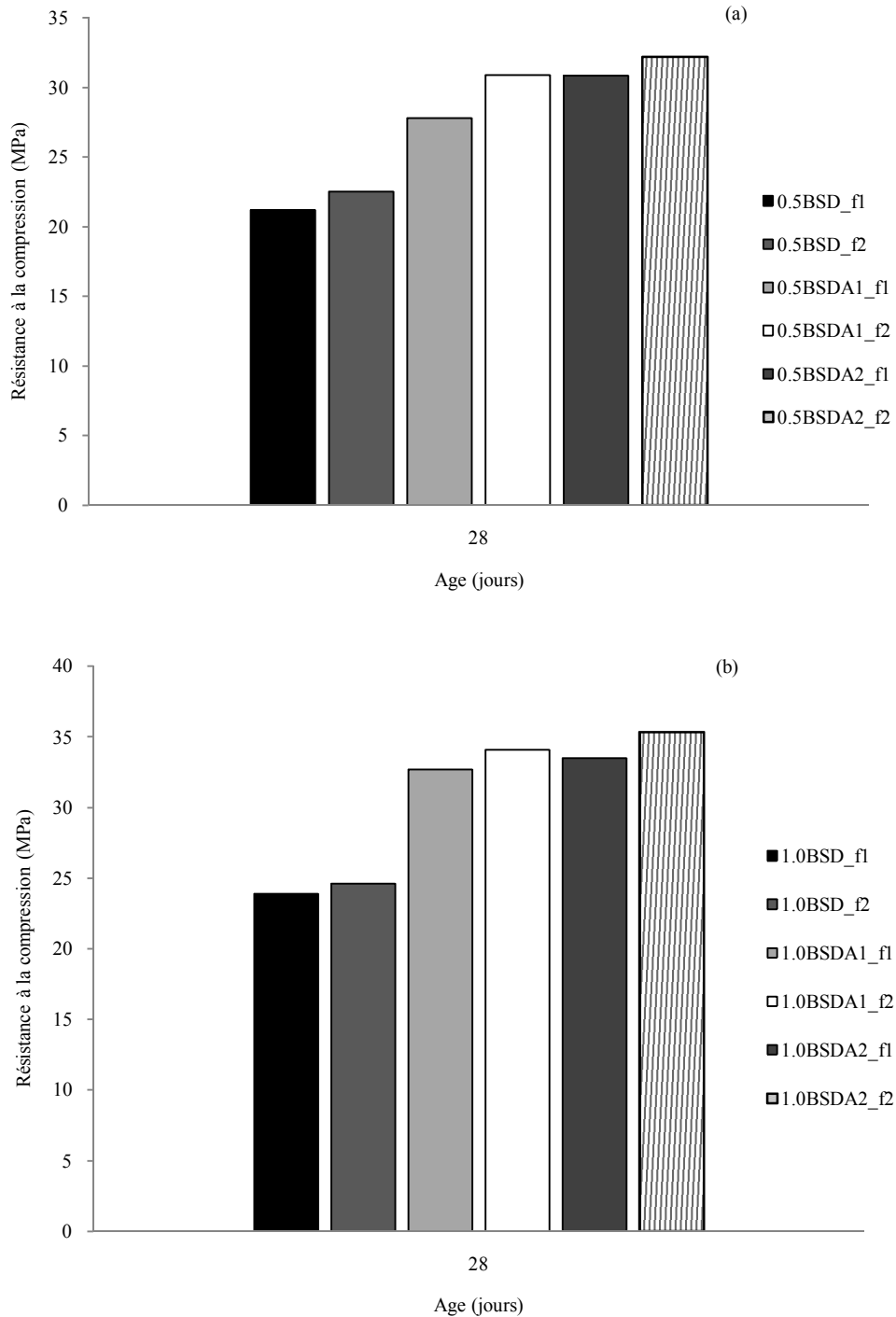


Figure IV.34 : L'effet du dosage et de l'élongement des fibres sur la résistance à la compression du BSD, BSDA1 et BSDA2.

IV.3.3.2. Résistance à la flexion

Les résultats des mélanges BSD, BSDA1 et BSDA2 indiqués sur la figure IV.35 témoignent d'une amélioration significative de la résistance à la flexion des bétons de sable de dunes BSDA1 et BSDA2, respectivement de l'ordre de 34,17% et 46,84%, par rapport au BSD à 28 jours. Cet accroissement ne peut être expliqué que par l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes, ayant un module de finesse égale à 1.0, qui selon les prescriptions réglementaires est classés parmi les sables très fins, par un sable alluvionnaire caractérisé par un module de finesse de l'ordre de 2,73 montrant, qu'il s'agit d'un sable préférentiel. Et aussi par la quantité d'eau de gâchage du béton de sable de dunes, dont le rapport E/C est égale à 0,60 qui est supérieur à celui des deux mixtures BSDA1 et BSDA2 qui est de l'ordre de 0,58. Quant aux résultats des deux mélanges à savoir BSDA1 et BSDA2, une amélioration de la résistance à la flexion du BSDA2 de l'ordre de 9,43% a été obtenue par rapport au BSDA1.

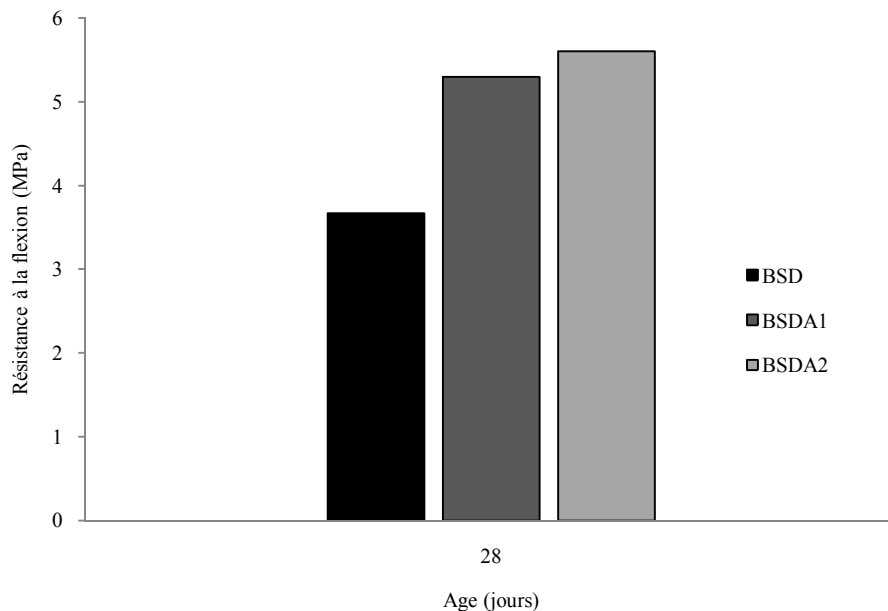


Figure IV. 35 : Résistance à la flexion des bétons témoins en fonction d'âge.

Les figures IV.36a, 36b, 36c montrent les résultats de la résistance à la flexion de l'ensemble des mixtures avec et sans fibres à 28 jours. Ces résultats indiquent qu'il y a une amélioration des bétons renforcés de fibres par rapport aux bétons sans fibres. La figure IV.36a montre qu'il y a effectivement un accroissement de la résistance à la flexion des bétons 0.5BSD_f₁, 1.0BSD_f₁, 0.5BSD_f₂ et 1.0BSD_f₂ par rapport au BSD respectivement de l'ordre de 18,99%, 81,01%, 26,33% et 85,57%.

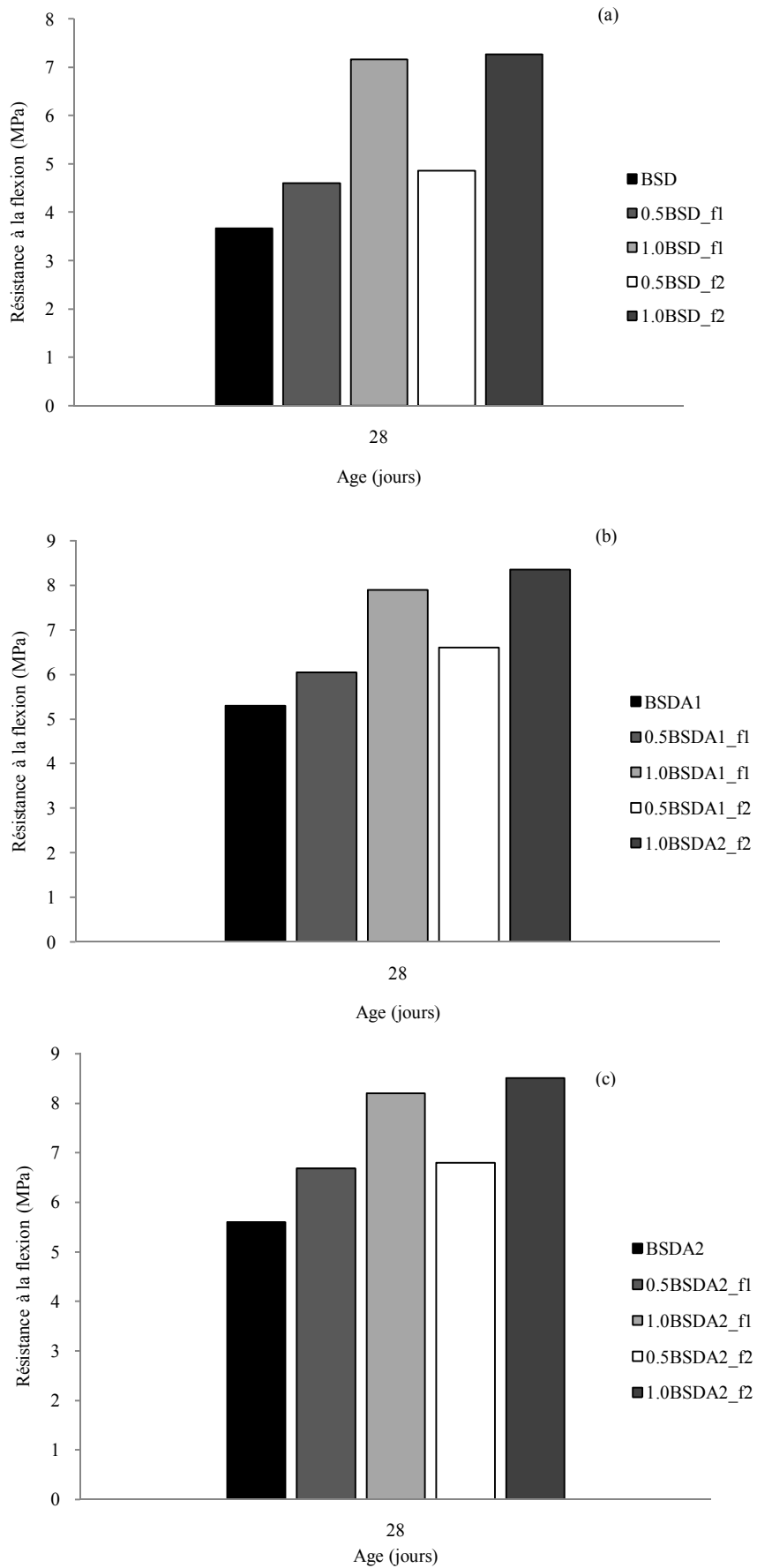


Figure IV.36 : Résistance à la flexion du BSD, BSDA1 et BSDA2 avec et sans fibres en fonction d'âge.

Également, pour les bétons 0.5BSDA1_f₁, 1.0BSDA1_f₁, 0.5BSDA1_f₂ et 1.0BSDA1_f₂ une augmentation de la résistance à la flexion par rapport au BSDA1 respectivement de l'ordre de 17,36%, 50,75%, 24,53% et 57,55% a été observée (Figure IV.36b). Également, une amélioration du même genre a été obtenue cette fois-ci pour les mixtures 0.5BSDA2_f₁, 1.0BSDA2_f₁, 0.5BSDA2_f₂ et 1.0BSDA2_f₂ par rapport au béton témoin de l'ordre de 16,55%, 43,97%, 18,97% et 46,9% (Figure IV.36c).

Les meilleurs résultats de la flexion sont donc obtenus par les mêmes mélanges ayant affichés la meilleure amélioration de la résistance à la compression (BSDA2 avec et sans fibres). Cet accroissement est forcément dû à la fois à la correction granulométrique du sable de dunes et à la présence des fibres. Ces dernières agissent à la fois par l'effet du pourcentage, ainsi que par leurs dimensions (longueur et élanement).

L'ensemble des bétons réalisés avec l'ajout de fibres à des dosages de 0.5% et 1.0% sont présentés sur les figures IV.37a et 37b. Les mixtures confectionnées avec des fibres ayant un élanement plus élevé, présentent les meilleures résistances à la flexion. De ce fait, la plus importante augmentation est obtenue par l'ajout des fibres f₂, même chose que pour la résistance à la compression. Cependant, une augmentation est enregistrée pour la totalité des mélanges, où cette dernière varie d'un mélange à l'autre, elle est de l'ordre de 26,33%, 67,08% et 74,68% respectivement pour les mixtures 0.5BSD_f₂, 0.5BSDA1_f₂ et 0.5BSDA2_f₂ et de 85,57%, 111,39% et 115,7% pour les mêmes mixtures mais à un dosage en fibres de 1.0% par rapport au béton témoin BSD.

En effet l'amélioration de la résistance à la flexion du béton par l'ajout des fibres a été observé par plusieurs auteurs (Luo et al., 2001; Gencel et al., 2011; Pawade et al., 2011; Dawood et Ramli, 2012; Yoo et al., 2015; Siddique et Kunal, 2016).

D'après ces résultats, nous remarquons que l'augmentation du dosage en fibres, ainsi que leurs élanements, sans oublier aussi l'effet de la correction granulométrique ont une influence sans équivoque sur l'amélioration de la résistance à la flexion. Cette dernière peut aller jusqu'à 132% pour le mélange 1.0BSDA2_f₂.

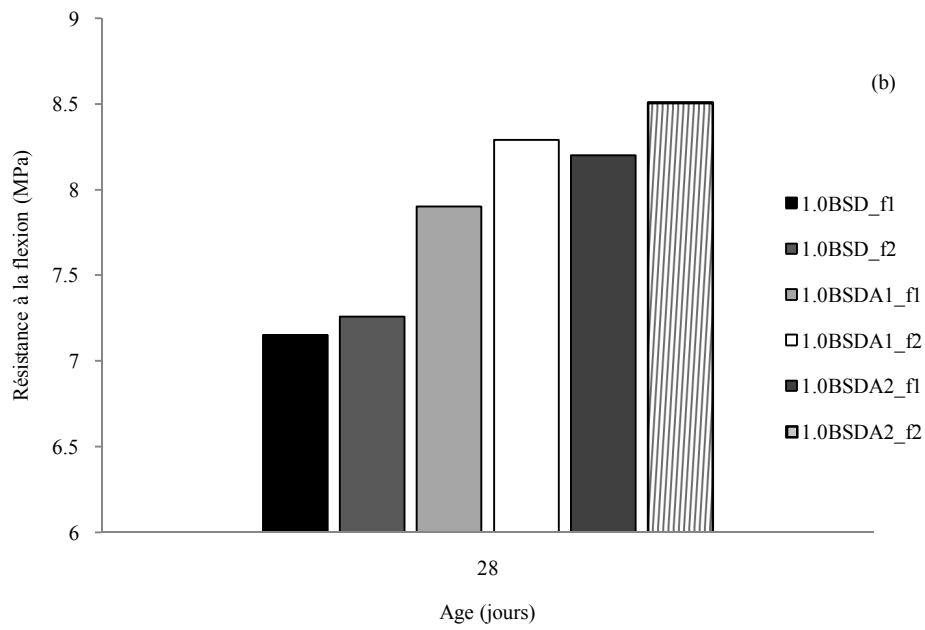
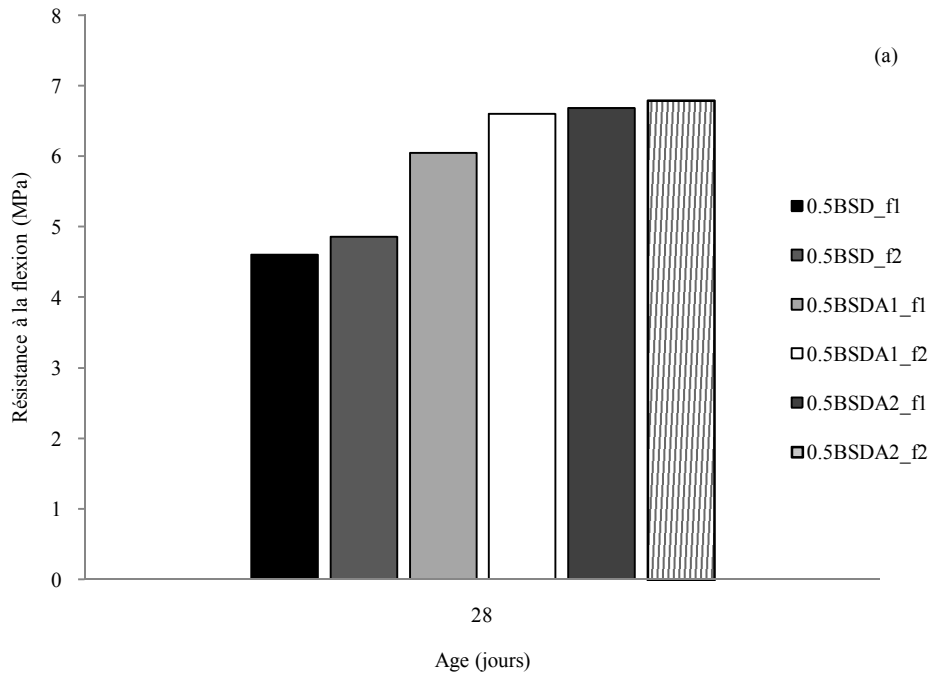


Figure IV.37 : L'effet du dosage et de l'élanement des fibres sur la résistance à la flexion du BSD, BSDA1 et BSDA2.

IV.3.4. Propriété rhéologique (retrait)

Le retrait du béton est un phénomène très complexe du fait qu'il est lié à plusieurs paramètres à savoir la composition du béton, la qualité des granulats, la nature et le dosage en ciment, la quantité d'eau de gâchage et les conditions de conservation.

Dans cette étude nous allons tenter d'évaluer le retrait de séchage du béton de sable de dunes avec et sans fibres, dans des conditions de conservations au laboratoire avec une moyenne de température allant jusqu'à 35°C. Ceci pour avoir une idée proche de la réalité sur le comportement du béton dans des conditions climatiques hyperarides caractérisées par des températures excessives, ayant généralement des répercussions négatives sur la durabilité des bétons.

IV.3.4.1. Retrait de séchage du béton

Le retrait de séchage ou de dessiccation du béton est une déformation volumique qui provient du séchage du béton. Ce dernier résulte de la présence d'eau libre dans la microstructure qui n'a pas été utilisée par les réactions d'hydratation, en s'évaporant du béton par le phénomène de migration vers la surface extérieure provoquant ainsi une dessiccation.

IV.3.4.1.1. L'effet de la correction granulométrique

Les résultats de l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes sur le retrait de dessiccation sont présentés sur la figure IV.38. Ils révèlent que la correction granulométrique du sable de dunes avec un sable alluvionnaire ayant un module de finesse préférentiel $M_f = 2,73$ contribue d'une manière significative à la réduction du retrait. Cette diminution est respectivement de l'ordre de 18,11 et 33,66 % pour les mélanges BSDA1 et BSDA2 par rapport au béton de sable de dunes (BSD) à 730 jours. D'un autre côté, nous avons observé une amélioration du retrait du mélange BSDA2 par rapport au mélange BSDA1 de l'ordre de 13,16%.

Cette diminution du retrait est la conséquence directe de la correction de la granulométrie du sable de dunes, ayant comme effet l'amélioration de son module de finesse par l'ajout de sable alluvionnaire.

Dans le même contexte, Bouziani et al. (2012) ont observé que le mélange du béton de sable réalisé avec du sable alluvionnaire et 15% de sable de dunes, donne une valeur du retrait plus élevée de l'ordre de 520 $\mu\text{m}/\text{m}$, par rapport au mélange préparé uniquement avec du sable alluvionnaire où la valeur du retrait est de l'ordre de 460 $\mu\text{m}/\text{m}$.

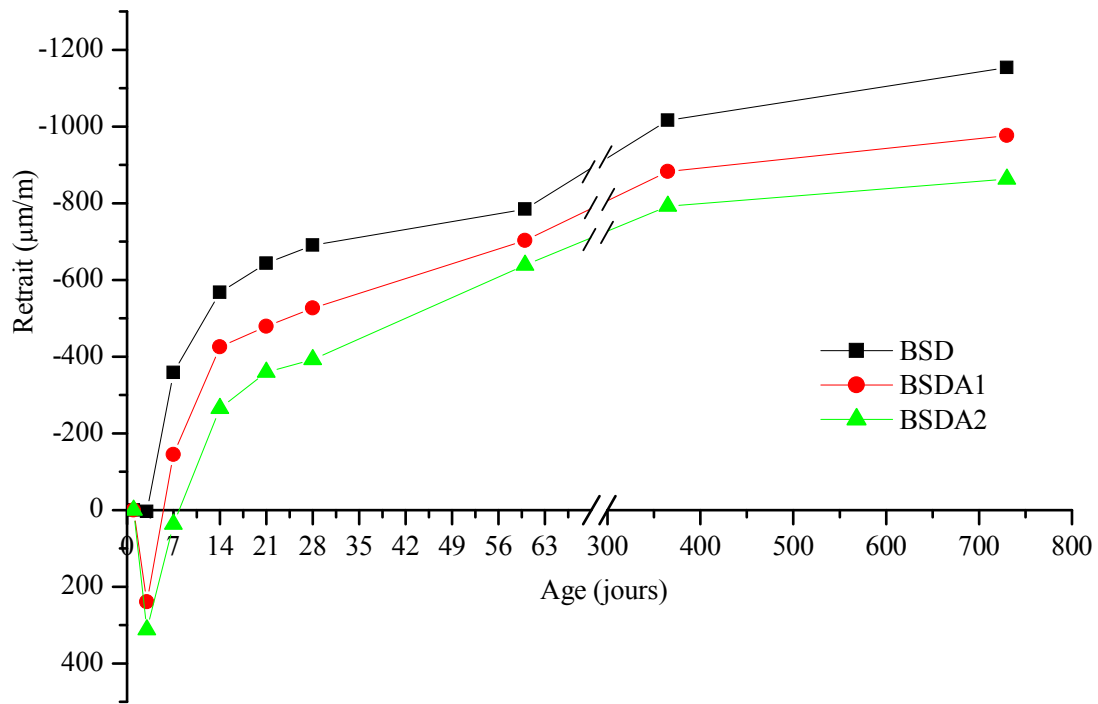


Figure IV.38 : Retrait en fonction d'âge des bétons témoins.

Cette observation est en commun accord avec nos résultats ; dans lesquels nous avons remarqué que l'augmentation de la quantité du sable de dunes conduit à une augmentation du retrait. Même chose pour Taфраoui (2009) qui a rapporté que les bétons réalisés avec du sable de dunes présente un retrait élevé au cours des 100 jours d'étude. Les tests effectués par Bouaziz et al., (2013) ont montré l'effet bénéfique de la correction granulométrique du sable de dunes, avec une réduction significative du retrait de l'ordre de 54 % à 7 jours.

IV.3.4.1.2. L'effet de l'addition des fibres

Le retrait libre des éprouvettes après 730 jours de séchage est montré sur les figures IV.39, IV.40 et IV.41. Où nous pouvons constater d'une manière générale une diminution du retrait du béton de sable renforcé par des fibres métalliques issues de pneus usés.

De nombreux auteurs (Chern et Young, 1989 ; Mesbah et Buyle-Bodin, 1999 ; Beddar et Belagraa, 2003 ; Chen et Liu, 2004 ; Corinaldesi et Moriconi, 2004 ; Chen et Liu, 2005 ; Atis et Karahan, 2009 ; Sounthararajan et Sivakumar, 2013) ont observé qu'il y a une diminution du retrait du béton par l'ajout de fibres.

La réduction de retrait du béton en raison de l'ajout de fibres a été expliquée par Atis et Karahan (2009), comme suit : les fibres ajoutées au mélange du béton sont distribuées au hasard, et seulement certaines d'entre elles sont distribuées parallèlement à la contrainte du retrait. Lorsque le béton se rétrécit, ces fibres réduisent le retrait.

La figure IV.39 montre une diminution du retrait des mélanges du béton de sable de dunes ayant un dosage en fibres $V_f = 0,5\%$ par rapport au béton de sable de dunes sans fibres (BSD) à 730 jours. Cette diminution du retrait est de l'ordre de 14,07% pour la mixture 0.5BSD_f₁ et 15,78% pour le mélange 0.5BSD_f₂. Quant aux mélanges réalisés avec un dosage en fibres $V_f = 1,0\%$, la réduction du retrait à 730 jours est largement plus importante, de l'ordre de 28,04% pour la mixture 1.0BSD_f₁ et 35,8% pour le mélange 1.0BSD_f₂. Pour les mélanges 0.5BSDA1_f₁ et 0.5BSDA1_f₂ (Figure IV.40), la diminution du retrait est respectivement de l'ordre de 6,08% et 8,03% par rapport au béton de sable sans fibres (BSDA1) à 730 jours.

Cependant, l'influence de l'incorporation des fibres dans les bétons à un taux de 1,0% est plus importante que celle des bétons formulés avec un taux de 0,5%. Il est respectivement de l'ordre de 16,39% pour le mélange 1.0BSDA1_f₁ et 27% pour la mixture 1.0BSDA1_f₂ par rapport au béton de sable sans fibres (BSDA1). Pour les mélanges BSDA2 à dosage en fibres $V_f = 0,5\%$, la diminution du retrait à 730 jours est de l'ordre de 5,08% pour la mixture 0.5BSDA2_f₁ et 6,02 % pour le mélange 0.5BSDA2_f₂ par rapport au béton de sable sans fibres (Figure IV.34). Néanmoins, avec un dosage en fibres $V_f = 1,0\%$, la réduction du retrait est de l'ordre de 11,96 % pour 1.0BSDA2_f₁ et 40,53 % pour 1.0BSDA2_f₂ par rapport au béton de sable sans fibres (BSDA2). Nous remarquons généralement d'après l'ensemble de ces résultats, qu'il y a une amélioration du retrait due à la fois à l'effet de la correction granulométrique et à l'ajout des fibres.

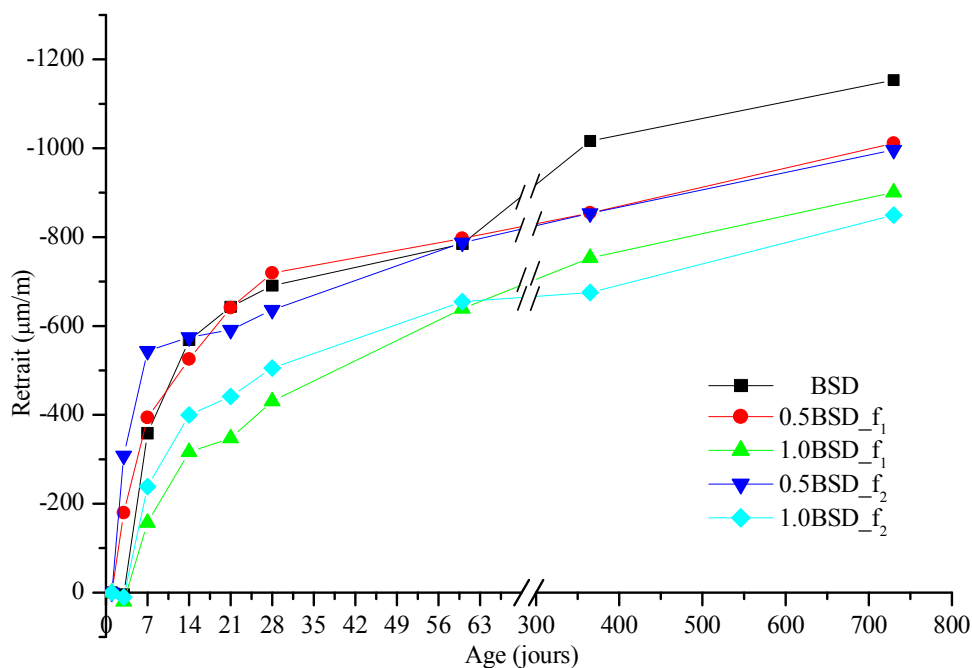


Figure IV.39 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSD.

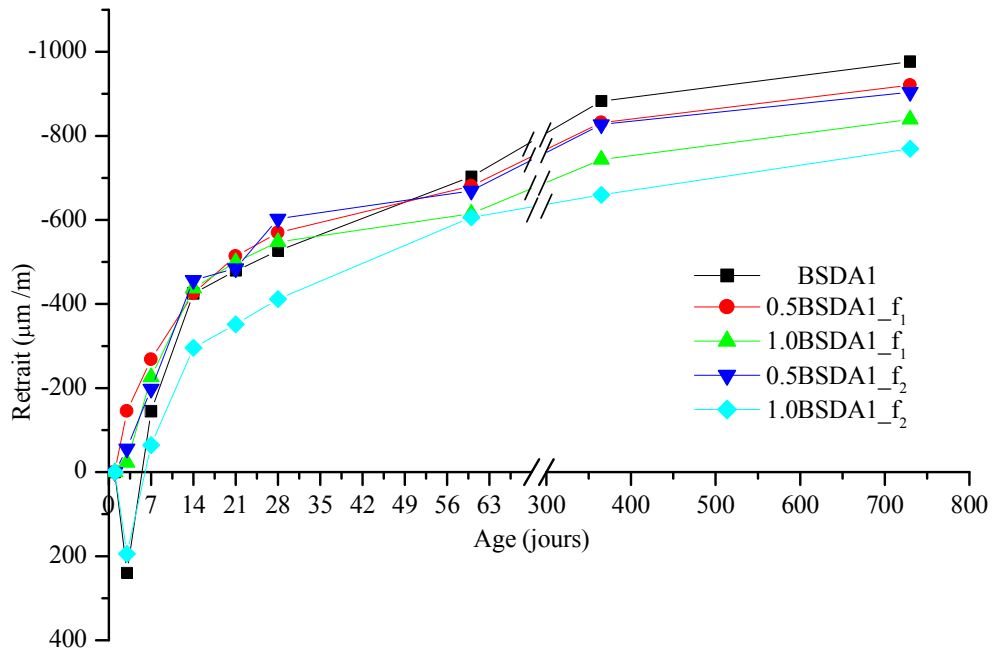


Figure IV.40 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSDA1.

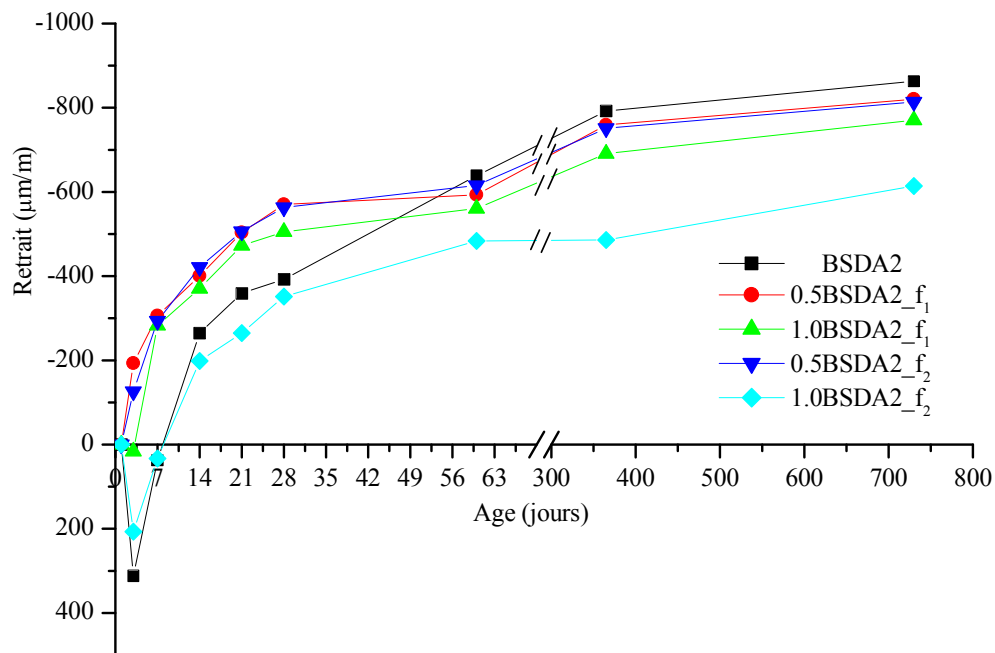


Figure IV.41 : Retrait en fonction d'âge des mélanges BSDA2.

Suivant les résultats obtenus pour l'ensemble des mélanges : BSD_{f_1} , BSD_{f_2} , $BSDA1_{f_1}$, $BSDA1_{f_2}$, $BSDA2_{f_1}$ et $BSDA2_{f_2}$, formulés avec les différents taux de fibres (Figures IV.42 et IV.43), le retrait des bétons de sable ayant un dosage en fibres $V_f = 0,5\%$ est supérieur à celui du même mélange formulé avec un dosage en fibres $V_f = 1,0\%$. De ce fait, nous pouvons conclure que la diminution du retrait des bétons de sable est plus significative avec

l'augmentation des dosages en fibres. Cela peut être expliqué par le nombre élevé de fibres avec un dosage en fibres $V_f = 1,0\%$, entraînant probablement plus de fibres avec des positions perpendiculaires par rapport aux fissures jouant le rôle de couture, arrêtant ainsi la propagation des microfissures.

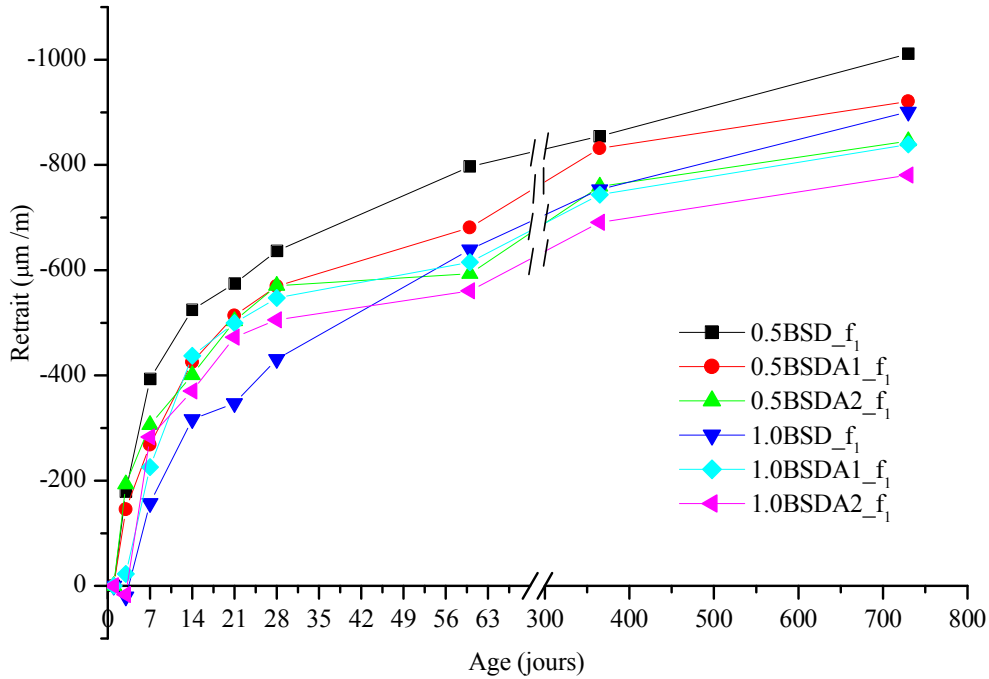


Figure IV.42 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec les fibres f_1 .

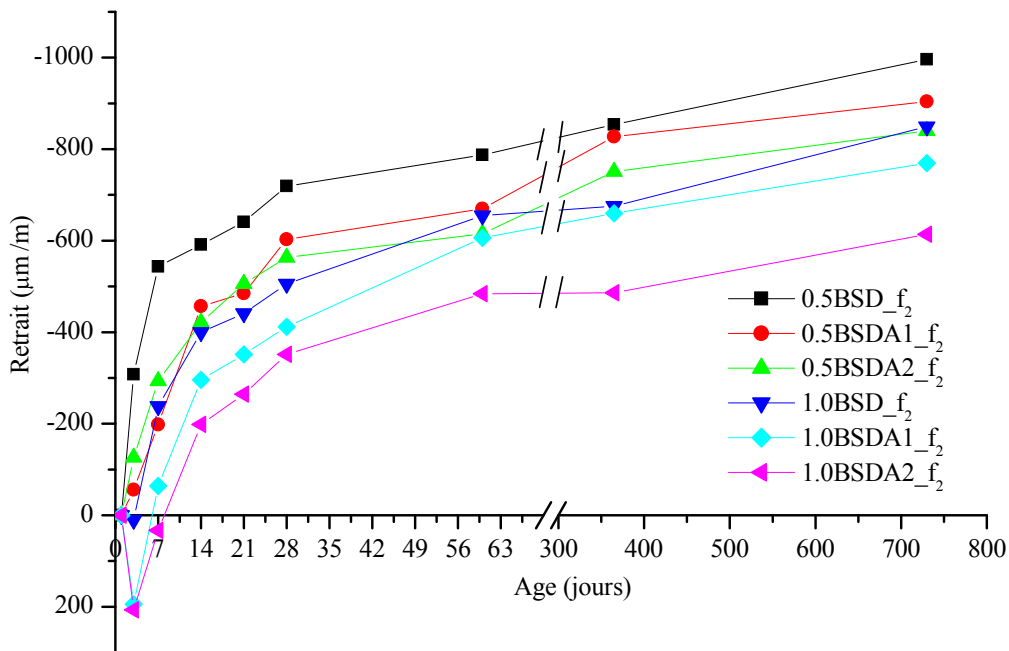


Figure IV.43 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec les fibres f_2 .

Avec les mélanges : BSD_ f_1 , BSD_ f_2 , BSDA1_ f_1 , BSDA1_ f_2 , BSDA2_ f_1 et BSDA2_ f_2 , aucune réduction significative du retrait de séchage n'a été observée entre les mélanges réalisés avec des fibres f_1 et ceux confectionnés avec des fibres f_2 à dosage en fibres $V_f = 0,5\%$ (Figure IV.44). Néanmoins, le retrait diminue de manière significative à taux de fibres $V_f = 1,0\%$, entre les mélanges réalisés avec des fibres f_1 et ceux fabriqués avec des fibres f_2 , en particulier 1.0 BSDA2_ f_2 qui a enregistré une diminution de l'ordre de 40,53% par rapport au béton de sable sans fibres. Cela est dû essentiellement à la correction de la granulométrie du sable de dunes avec un taux de 60% de sable alluvionnaire et à l'incorporation des fibres ayant le plus grand rapport $l/d = 107,14$ (Figure IV.45).

La diminution du retrait du béton due à l'augmentation du dosage en fibres a été observée par plusieurs auteurs. Pour Atis et Karahan (2009), la diminution du retrait de séchage pour une durée de 210 jours était de 10%, 21%, 25% et 26% pour les mélanges de béton renforcés respectivement de 0,25%, 0,50%, 1,0% et 1,5% en fibre d'acier par rapport au mélange témoin. Chern et Young (1989) atteste que les échantillons du béton contenant des taux en fibres plus élevés donnent un retrait, un fluage de base et une déformation totale moins élevés, dans des conditions sèches. Sounthararajan et Sivakumar (2013) rapportent que l'effet des fibres en acier sur le retrait du béton pour un dosage en fibres de 0,5% entraîne une réduction uniforme, jusqu'à 15% et une réduction de 18% a été observée avec un dosage en fibres d'acier de 1,0%. Alekrish et Alsayed (1994) ont signalé des réductions dans les mesures de retrait allant de 16% à 28% en raison de l'ajout des fibres d'acier. Dans le même contexte, Sun et al. (2001) ont noté que le retrait du béton diminue avec l'augmentation de la quantité de fibres.

Il est nettement visible d'après les résultats présentés sur les Figures IV.44 et IV.45 que le rapport longueur/diamètre (l/d) a un rôle important dans la diminution du retrait des différents mélanges. Où nous trouvons que la fibre f_2 avec un élancement l/d égal à 107,14 a plus d'influence sur l'amélioration du retrait des bétons que la fibre f_1 , ayant un élancement l/d égal à 71,43.

Dans ce travail, les résultats obtenus indiquent que la plus importante baisse du retrait des bétons de sable est obtenue avec la fibre f_2 . Cela peut être expliqué par l'importance de la longueur de cette dernière, qui se solde par une augmentation de la zone de contact entre les fibres et la matrice cimentaire, augmentant ainsi leurs adhérences ou bien autrement leurs forces à l'arrachement, pour enfin participer à faire stopper la propagation des microfissures.

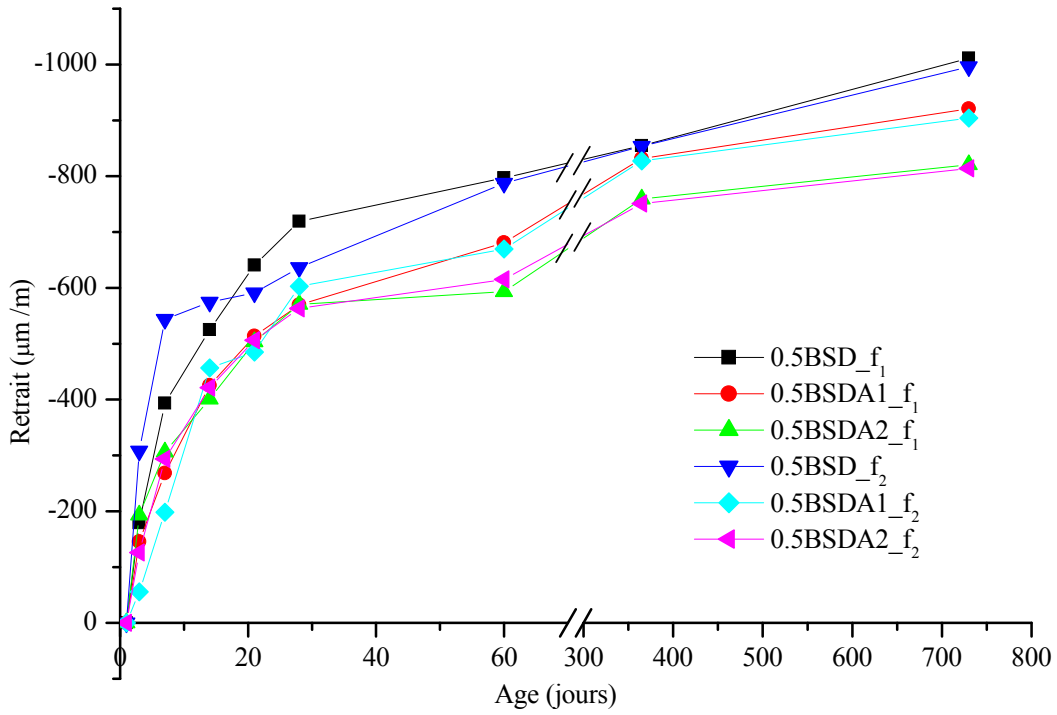


Figure IV.44 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec f_1 et f_2 à $V_f=0.5\%$.

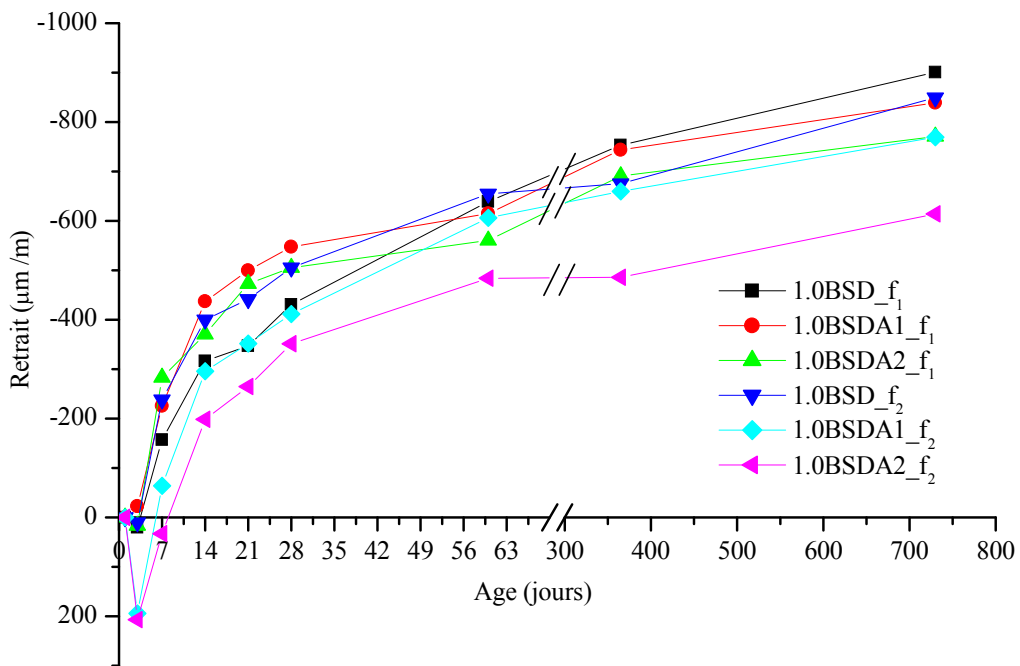


Figure IV.45 : Retrait en fonction d'âge des mélanges formulés avec f_1 et f_2 à $V_f=1\%$.

En effet, selon Yazıcı et al. (2007), dans un béton de sable renforcé par des fibres les facteurs les plus importants qui affectent les propriétés du béton sont l'élanement l/d et le dosage en fibres (V_f). Sun et al. (2001), ont signalé que lorsque nous avons la même matrice de béton, l'effet des fibres hybrides sur la résistance du retrait était principalement lié à des facteurs, tels que le dosage en fibres (V_f), les dimensions de la fibre (d_f , l_f) et le module élastique de la fibre. Dans leur étude Barr et al. (2003), ont expliqué que le niveau de contrainte exercée par les fibres peut-être inférieure en raison du faible élanement ($l/d = 53$) des fibres utilisées dans les mélanges de bétons renforcés par des fibres.

IV.3.5. Perte en poids

IV.3.5.1. Evolution de la Perte en poids en fonction du temps

La perte en poids en fonction d'âge des éprouvettes après 730 jours de séchage est présentée sur les figures IV.46, IV.47, IV.48 et IV.49. Où nous pouvons distinguer que la perte en poids est plus importante pour l'ensemble des bétons de sable renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés par rapport aux bétons de sable sans fibres. Ces résultats concordent avec ceux rapportés par Mesbah et Buyle-Bodin (1999) et Beddar et Belagraa (2003).

les figures IV.46, IV.47, IV.48 et IV.49 montrent également que la perte en poids est plus importante pour les bétons de sable renforcés de fibres métalliques avec un dosage en fibres de 1% par rapport aux bétons de sable renforcés de fibres avec un dosage de 0,5%. Ce phénomène peut s'expliquer par la présence des fibres dans le béton menant à la création des chemins préférentiels favorisant l'élimination de l'eau, laquelle est plus importante avec l'augmentation du dosage en fibres.

Nous pouvons distinguer aussi suivant les figures IV.46, IV.47, IV.48 et IV.49, que dans le premier palier plus particulièrement entre 7 et 60 jours, qu'il y a une augmentation de la perte en poids, par contre au delà de 60 jours et jusqu'à 730 jours une diminution de la perte en poids qui a tendance à se stabilisée pour l'ensemble des mélanges. Selon Pihlajavaara (1977), lorsque la carbonatation et le séchage s'installent en même temps, on observe une augmentation de la masse en raison de la fixation du dioxyde de carbone.

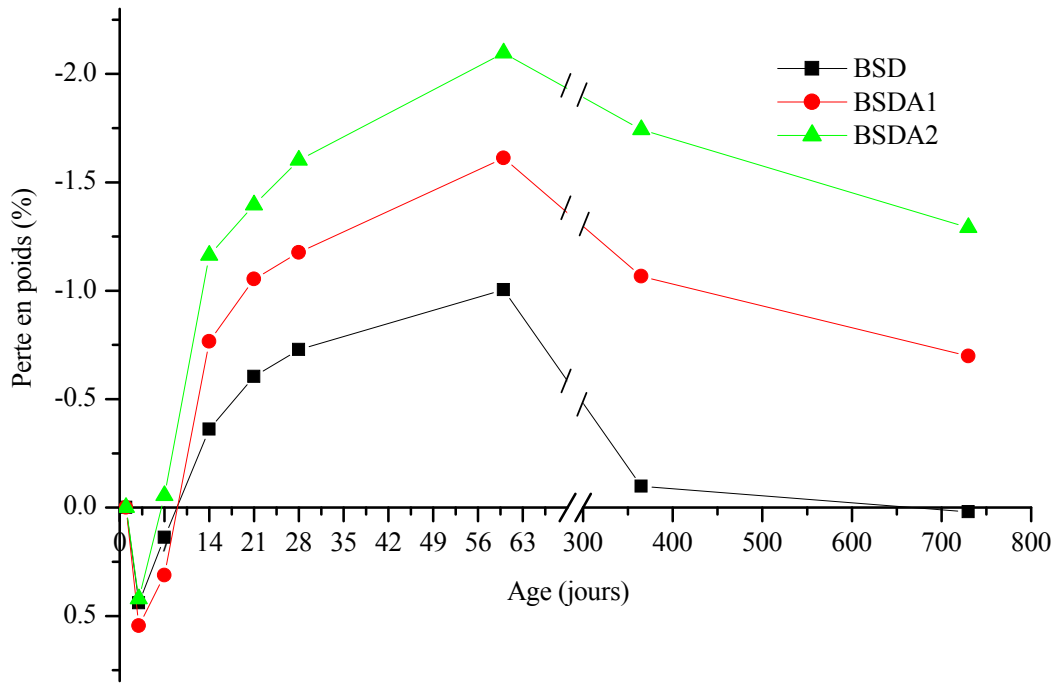


Figure IV.46 : Perte en poids en fonction d'âge pour les bétons témoins.

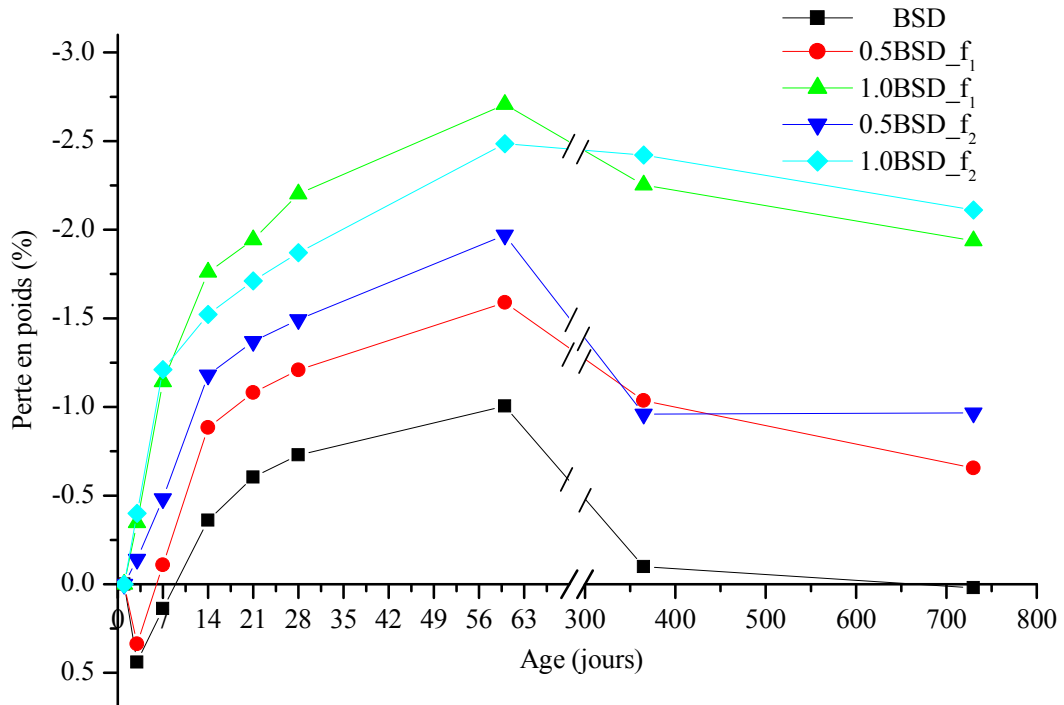


Figure IV.47 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSD.

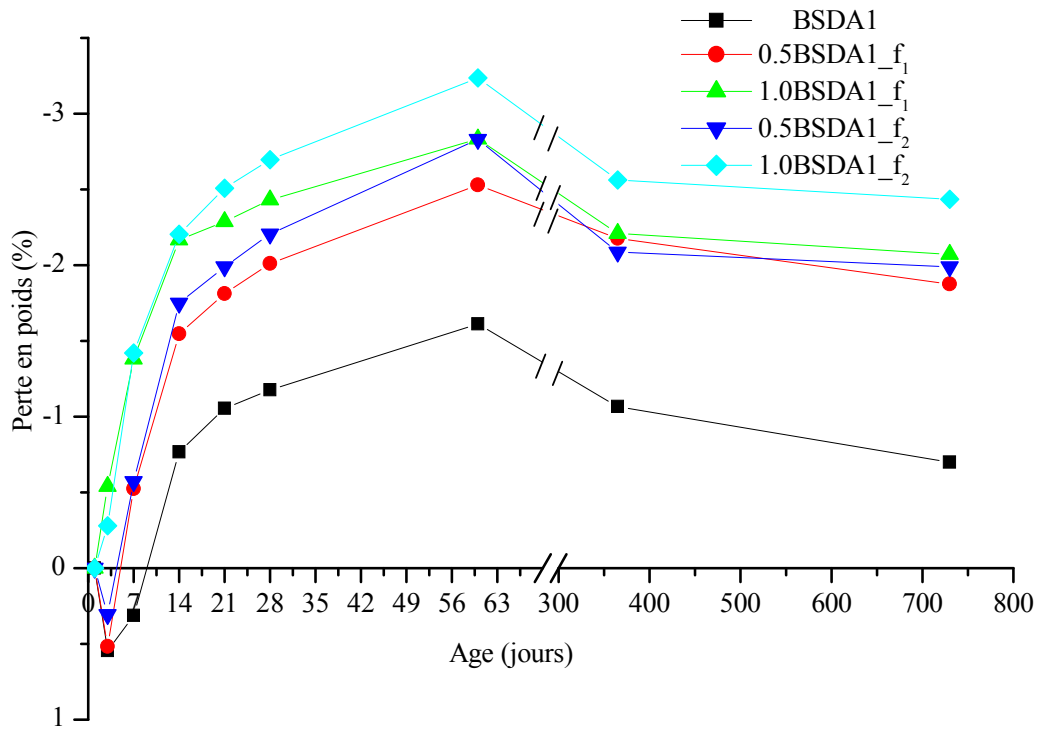


Figure IV.48 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA1.

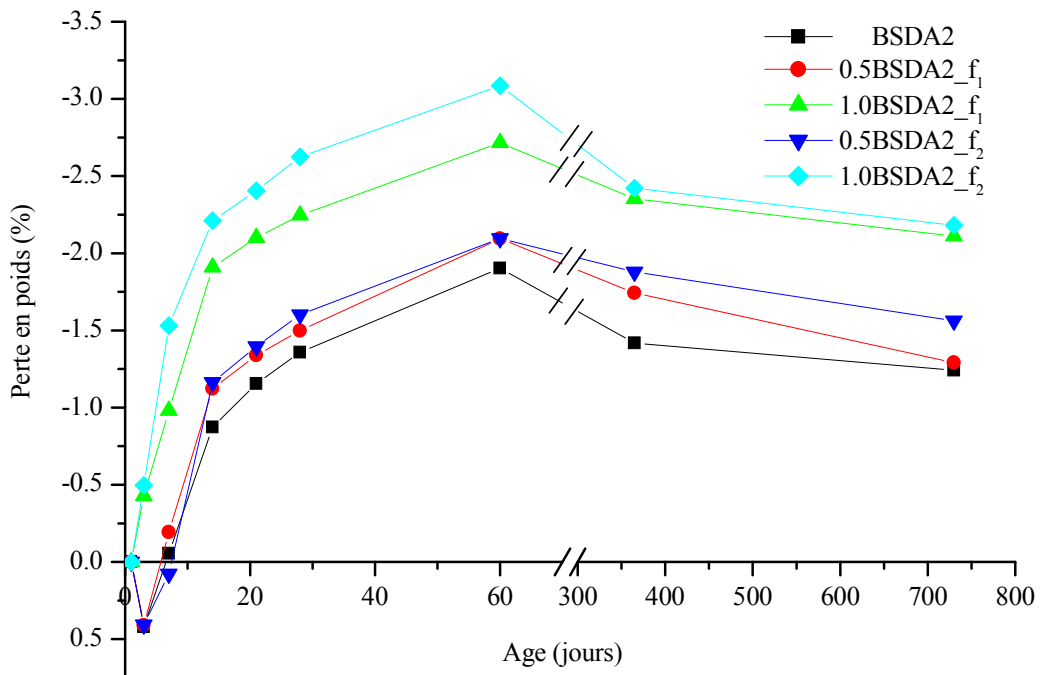


Figure IV.49 : Perte en poids en fonction d'âge pour les mélanges BSDA2.

IV.3.5.2. Evolution du retrait en fonction de la perte en poids

D'après les figures IV.50, IV.51, IV.52 et IV.53 représentant le retrait en fonction de la perte en poids après 730 jours. Nous pouvons remarquer d'après les résultats trouvés, que la perte en poids des bétons de sable renforcés par des fibres est plus importante par rapport aux bétons sans fibres.

D'un autre côté nous pouvons distinguer d'après l'allure des courbes qu'il y a eu une reprise de poids pour l'ensemble des mélanges entre 60 et 730 jours. Ce phénomène d'après Mesbah et Buyle-Bodin (1999), peut être lié à la carbonatation et expliqué par la porosité élevée de ces mortiers, qui permet la pénétration du gaz carbonique.

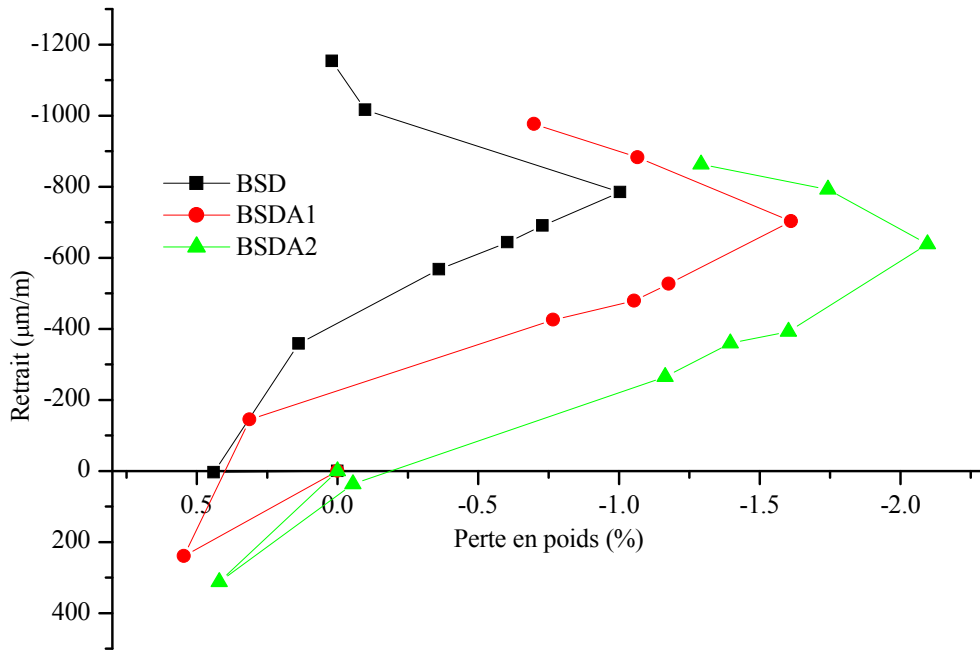


Figure IV.50 : Retrait en fonction de perte en poids pour les bétons témoins.

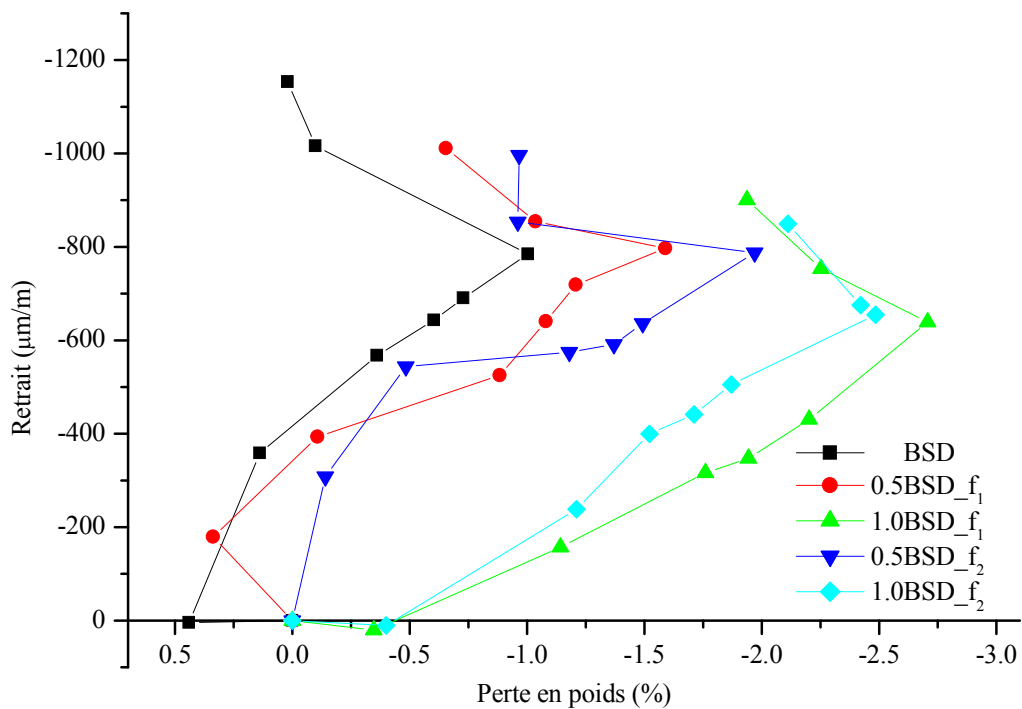


Figure IV.51 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSD.

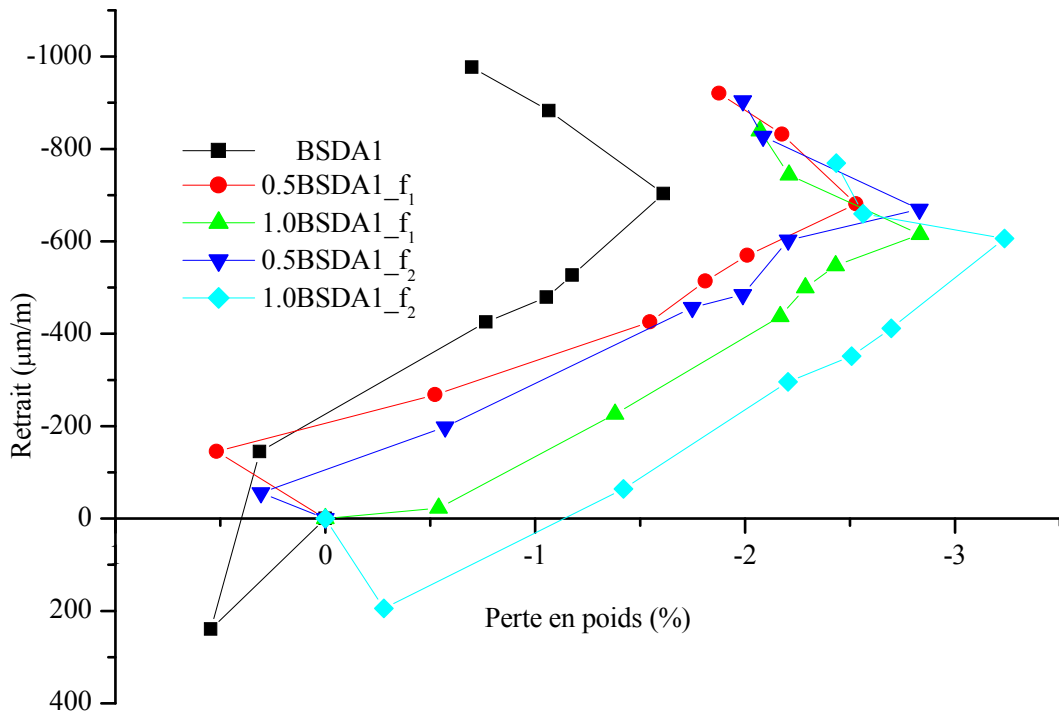


Figure IV.52 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSDA1.

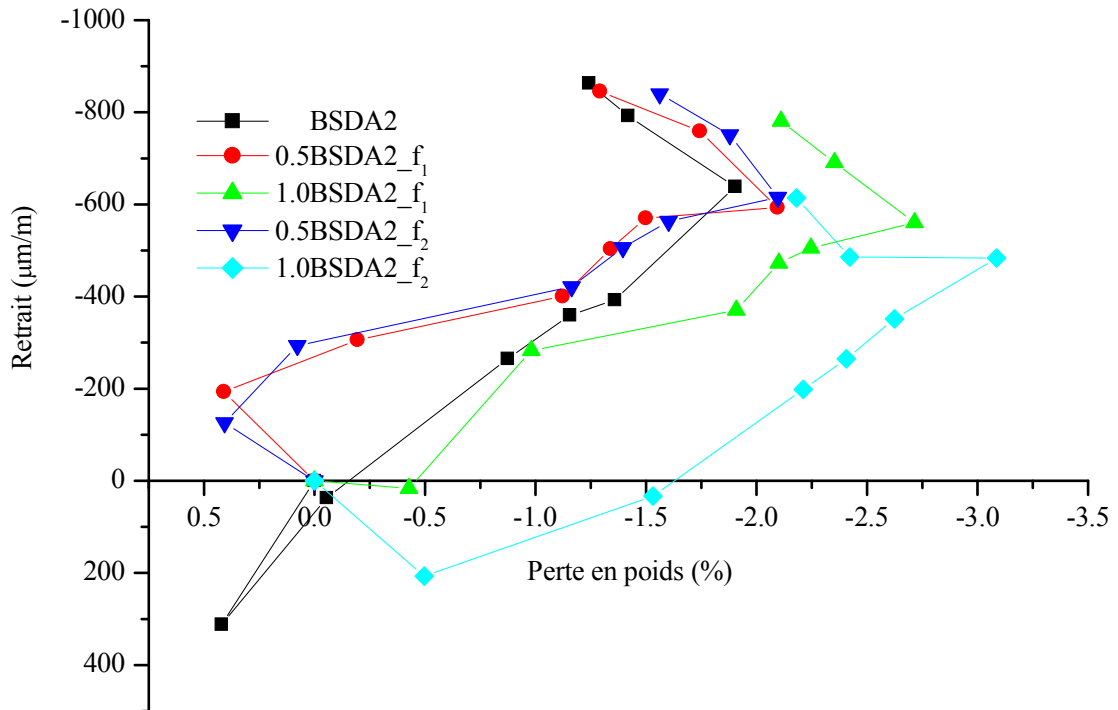


Figure IV.53 : Retrait en fonction de perte en poids pour les mélanges BSDA2.

IV.4. Conclusion

L'étude de l'ensemble des résultats concernant les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologique des bétons de sable de dunes, nous a permis de dégager l'essentiel de ce que nous pouvons retenir comme résultats de ce chapitre :

- Les fibres de pneus usagés ont une bonne résistance à la traction comparativement aux fibres commercialisées ;
- Le sable de dunes étudié présente une granulométrie très serrée et discontinue ; nécessitant une correction de sa granulométrie ;
- Une plus grande quantité d'eau a été utilisée pour les bétons fabriqués avec 100% du sable de dunes par rapport aux autres mélanges, en raison de sa granulométrie très fine ;
- La maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage du sable de dunes, du dosage en fibres et de l'élanement l/d ;
- Pour les sables obtenus à partir du mélange SD et SA, une amélioration de l'équivalent de sable a été observée par rapport à 100% SA ;
- L'ensemble des fibres utilisées avaient un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques ;
- Les paramètres qui gouvernent l'amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologique des bétons de sable de dunes fibrés sont : la taille des fibres, la liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, le dosage en fibres, la rigidité des fibres, l'orientation des fibres et la composition granulaire ;
- Les mélanges ayant un dosage en fibres important, présentent une meilleure amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologique (retrait) ;
- L'influence de la longueur des fibres sur l'orientation préférentielle ; les fibres ayant une longueur supérieure à la largeur du moule, ont tendance à s'orienter parallèlement à la longueur de ces derniers et perpendiculairement à la charge appliquée, augmentant ainsi la résistance des bétons à la fissuration ;
- L'influence de la fibre f_2 ayant un élanement l/d de 107,14 sur la diminution du retrait est plus significative, que celle de la fibre f_1 avec un élanement l/d de 71,43. Le meilleur résultat a été obtenu par la mixture 1.0BSDA2_ f_2 avec un taux de 40,53 % par rapport au béton sans fibres ;
- L'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion des bétons de sable et la diminution du retrait sont tributaires à l'augmentation de l'élanement l/d ;

- La correction granulométrique du sable de dunes avec un sable alluvionnaire avait un effet positif à la fois sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques et la diminution du retrait ;
- La perte en poids est plus importante pour les bétons de sable renforcés de fibres métalliques issues de pneus usagés comparativement aux bétons de sable sans fibres.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Par leurs utilisations, les bétons fibrés peuvent présenter une contribution non négligeable notamment sur le plan technique, où ils peuvent être associés avec des armatures traditionnelles, voire un remplacement total des armatures transversales. Cependant, un souci lié au coût relativement élevé des fibres vient souvent entraver ce projet. De ce fait, les industriels et les laboratoires devront s'associer pour faire face à ce problème en s'orientant vers la valorisation des déchets industriels.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse, ayant comme objectif essentiel l'étude des effets de la correction granulométrique du sable de dunes et l'ajout des fibres métalliques issues des pneus usagés sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

En premier lieu, un béton à base de 100% de sable de dunes renforcé de fibres métalliques pour l'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisé. Suite aux résultats obtenus, nous nous sommes aperçus que le sable de dunes présente des anomalies dues plus particulièrement à sa granulométrie. De ce fait, une correction du sable de dunes (SD) par un sable alluvionnaire (SA) a été adoptée suite à une série de tests qui s'est soldée par le choix de deux proportions à savoir : 50% SD + 50% SA et 40% SD + 60% SA. En second lieu, plusieurs mixtures à la base de ces proportions ont été confectionnées principalement pour l'évaluation du retrait ainsi que la résistance à la compression et à la flexion. Quant à l'utilisation des fibres, nous nous sommes basés sur la littérature pour le choix notamment des dimensions (longueur et diamètre), ainsi que leurs dosages.

La campagne expérimentale a été menée en deux étapes, la première est consacrée aux caractéristiques mécaniques du béton de sable de dunes qui s'est déroulée sur une période de six mois, la deuxième est destinée à l'étude de la propriété rhéologique (retrait), qui s'est étalée sur une période de deux ans.

Les essais sur les bétons frais sont axés sur les mesures de l'ouvrabilité réalisées à l'aide de l'essai Vébé, essai au maniabilimètre "B" LCL, et l'essai à la table à secousse. Ces derniers montrent que le temps d'écoulement des mixtures augmente avec l'accroissement du pourcentage

du sable de dunes, de la longueur des fibres, du taux de fibres incorporées, de l'élançement (l/d) et du rapport C/E.

Les tests de la compression et de la flexion du béton de sable de dunes sans fibres (BSD) et du béton de sable de dunes renforcé de fibres (BSD_f) ; nous ont permis de comprendre davantage le rôle joué par l'introduction des fibres métalliques issues de pneus usagés dans l'amélioration du comportement du béton de sable de dunes et plus particulièrement l'influence de leurs caractéristiques géométriques à savoir : la longueur, le diamètre et l'élançement (l/d). D'après les résultats expérimentaux obtenus, il est avéré que pour les fibres (f_1 et f_2) ayant même natures et diamètres mais de longueurs différentes, les meilleurs résultats de la résistance à la compression et à la flexion du BSD_f, sont obtenus par les fibres ayant la plus importante longueur respectivement de l'ordre de 28% et 20,84%, pour un dosage en fibres de 1.5% par rapport au béton témoin. Quant à l'influence de l'élançement (l/d), les résultats trouvés montrent que l'introduction de la fibre f_3 avec l'élançement le plus élevé de l'ordre de 142,86 présente la meilleure amélioration de la résistance à la compression et à la flexion respectivement de l'ordre de 55% et 29%, pour un dosage en fibres de 1.5% par rapport aux bétons témoins. Concernant l'influence du dosage en fibres sur la résistance à la compression et à la flexion, les meilleurs résultats de l'ensemble des mixtures sont obtenus par le dosage en fibres de 1.5%. D'autres paramètres ont une influence directe sur l'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion, parmi lesquels on peut citer l'adhérence des fibres avec la matrice cimentaire et leurs orientations.

La nature du sable de dunes ayant des grains très fins lui confère une granulométrie très serrée se répercutant sur les caractéristiques des bétons confectionnés à base de ce matériau. Dans ce travail, nous avons opté à une correction de la granulométrie du sable de dunes par un sable alluvionnaire avec les proportions citées précédemment. Les sables obtenus montrent une amélioration du module de finesse par rapport au sable de dunes et de l'équivalent de sable par rapport au sable alluvionnaire.

L'étude de la résistance à la compression et à la flexion des bétons sans fibres BSD (100% SD), BSDA1 (50% SD + 50% SA) et BSDA2 (40% SD + 60% SA) d'une part, et celle des bétons fibrés BSD_f, BSDA1_f et BSDA2_f d'autre part, montre qu'il y a une influence à la fois de la correction granulométrique du sable de dunes et l'ajout des fibres métalliques sur l'amélioration de la résistance mécanique. Où les meilleurs résultats de la compression et de la flexion respectivement de l'ordre de 92,91% et 132% sont obtenus par la mixture 1.0BSDA2_f₂ par rapport au béton BSD.

L'évaluation du retrait du béton de sable de dunes nous a permis de comprendre un petit peu mieux le comportement du béton de sable de dunes vis-à-vis ce phénomène complexe, plus particulièrement dans les zones arides, où sévissent des conditions extrêmes à savoir des températures allant jusqu'à 50°C à l'ombre. En tous, quinze mixtures ont été utilisées dans ce travail, parmi lesquels trois témoins et douze mixtures renforcés de fibres métalliques issues de pneus usagés. La mesure du retrait des différents mélanges nous révèle à la fois l'importance de la correction granulométrique du sable de dunes et l'introduction des fibres métalliques dans la diminution du retrait, où nous avons pu montrer l'influence de plusieurs paramètres. Le meilleur résultat obtenu par l'effet de la correction granulométrique du sable de dunes sur la diminution du retrait de l'ordre de 33,66% a été obtenu par le mélange BSDA2 par rapport au mélange BSD. Quant à l'influence de l'ajout des fibres sur le retrait, nous avons constaté que les mêmes paramètres qui ont conduit à l'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion ont d'une manière ou d'une autre participé à la réduction du retrait à savoir : les caractéristiques géométriques (longueur, élancement), le dosage et l'orientation des fibres. Une amélioration du retrait pour l'ensemble des bétons renforcés de fibres a été observée, néanmoins la diminution la plus importante du retrait de l'ordre de 40,53% a été obtenue par le mélange 1.0BSDA2_f₂ pour un dosage en fibres de 1%.

La mesure du retrait a été suivie par celle de la perte en poids, où nous avons constaté que la présence des fibres au sein de la matrice favorise le départ de l'eau par la création d'un réseau formé de petits canaux, conduisant ainsi à une perte en poids plus importante des bétons renforcés de fibres par rapport aux bétons sans fibres.

À partir de ce travail un aspect important peut être mis en évidence, en effet l'utilisation des fibres métalliques issues de pneus usés et du sable de dunes offrent l'opportunité de recycler un déchet industriel et de valoriser un matériau local; représentant ainsi à la fois une contribution à la réduction des coûts et une préservation de l'environnement.

De cette étude quelques points pertinents peuvent être tirés :

- Les fibres de pneus usagés ont une bonne résistance à la rupture comparativement aux fibres commercialisées ;
- Pour les sables obtenus à partir du mélange SD et SA, une amélioration de l'équivalent de sable a été observée par rapport à 100% SA ;
- La maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage du sable de dunes, du dosage en fibres et de l'élancement l/d ;

- L'ensemble des fibres utilisées avaient un effet positif sur l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques ;
- Les paramètres qui gouvernent l'amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologique des bétons de sable de dunes fibrés sont : la taille des fibres, la liaison entre les fibres et la matrice cimentaire, le dosage en fibres, la rigidité des fibres, l'orientation des fibres et la composition granulaire ;
- Les mélanges ayant un dosage en fibres important, présentent une meilleure amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologique (retrait) ;
- L'influence de la longueur des fibres sur l'orientation préférentielle ; les fibres ayant une longueur supérieure à la largeur du moule, ont tendance à s'orienter parallèlement à la longueur de ces derniers et perpendiculairement à la charge appliquée, augmentant ainsi la résistance des bétons à la fissuration ;
- L'influence de la fibre f_2 ayant un élancement l/d de 107,14 sur la diminution du retrait est plus significative, que celle de la fibre f_1 avec un élancement l/d de 71,43. Le meilleur résultat a été obtenu par la mixture 1.0BSDA2_ f_2 avec un taux de 40,53% de réduction par rapport au béton sans fibres ;
- L'amélioration de la résistance à la compression et à la flexion des bétons de sable et la diminution du retrait sont tributaires à l'augmentation de l'élancement l/d ;
- La correction granulométrique du sable de dunes avec un sable alluvionnaire avait un effet positif à la fois sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques et la diminution du retrait ;
- L'effet des dimensions des fibres (longueur, élancement) l'emportent sur le dosage en fibres dans la diminution du retrait ;
- La perte en poids est plus importante pour les bétons de sable renforcés de fibres métalliques issues de pneus usagés comparativement aux bétons de sable sans fibres.

Recommandations et perspectives

Enfin, il paraît que les objectifs tracés dans ce travail sont atteints. Toutefois, l'utilisation des fibres issues de déchets pneumatiques ayant des diamètres plus petits sont à étudier, plus particulièrement l'influence de l'effet oursin (nid d'oiseau) sur le pourcentage de fibres incorporées et l'ouvrabilité du béton.

L'utilisation d'ajouts (fillers) dans la perspective de réduire le dosage en ciment, ce qui se répercute sur la réduction du coût.

L'utilisation d'une approche différente que celle adoptée dans ce travail dans la formulation du béton afin d'atténuer certains points qui demeurent un obstacle quant à l'intégration de ce composite dans la construction.

Les résultats obtenus à travers ce travail nous renseignent que le béton confectionné à base de sable de dunes corrigé peut être utilisé dans la construction plus particulièrement dans les régions où le manque de granulats est très ressenti. Néanmoins, le passage à la réalisation de tests sur des éléments avec des dimensions beaucoup plus importantes que celles utilisées dans ce travail est très recommandé pour convaincre les partenaires dans ce domaine.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

1. Absi, E., 1994. Bétons de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au C.E.B.T.P. Annales de L'I.T.B.T.P. 520, 85-127.
2. Abu Seif, E.S., 2013a. Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: an experimental study. *Arabian Journal of Geosciences* 6, 857-863.
3. Abu Seif, E.S., 2013b. Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand, Kharga oasis, western desert, Egypt: an experimental study. *Jordan Journal of Civil Engineering* 7, 270-284.
4. ABQ, 2005. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton. Association béton Québec. 36p. http://betonabq.org/pdf/aDocument_Fibres.pdf
5. ACI, 1988. Design considerations for Steel fiber reinforced concrete. ACI committee 544, 85-S52.
6. ACI, 1995. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-95) and commentary (ACI 318R-95). ACI committee 318. 365 p.
7. ACI, 1996. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI committee 544.1R-96. 66p.
8. ACI, 1998. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete, ACI 544.3R-93, reapproved 1998. ACI Committee 544 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 10p.
9. ACI, 2002. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete Reported by Steel fiber reinforced concrete (SFRC), pp. 544.1R-7.
10. AFNOR, 2012. Testing Fresh Concrete-Part 3: Vebe Test. NF EN 12350-3, France.
11. Ahmad, Z., Ibrahim, A., Md., Tahir, P., 2010. Drying Shrinkage Characteristics of Concrete Reinforced With Oil Palm Trunk Fiber. *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(5), 1441-1450.
12. Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G., Maffezzoli, A., 2009. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management* 29, 1960-1970.
13. Ait-Tahar, K., 2000. Etude expérimentale des poutres combinées en béton de fibres. *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Série bimestrielle*; 3.

14. Ait-Tahar, K., 2001. Mode de rupture par flexion des poutres composites en béton de fibres. *Annales de l'I.T.B.T.P.* 4, 11-17.
15. Ait Aneur, M.M., 1998. Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales. Mémoire de magister, université de Tiaret, Algérie.
16. Alekrish, A.A., Alsayed, S.H., 1994. Shrinkage of Fibre and Reinforced Fibre Concrete Beams in Hot-Dry Climate. *Cement Concrete Composites* 6, 299-307.
17. Al-Harthy, A.S., Abdel Halim, M., Taha, R., Al-Jabri, K.S., 2007. The properties of concrete made with fine dune sand. *Construction and Building Materials* 21, 1803-1808.
18. Aliapur, 2007. <http://www.aliapur.fr/fr/actualites/campsas-plus-dun-million-de-pneus-abandonn%C3%A9s>. 18/07/2007.
19. Alsultan, M., 2012. Incendie de pneus au koweit. <http://www.lamauvaiseherbe.net/2012/04/25/koweit-5-millions-de-pneus-partent-en-fumee/>
20. Arquié, G., Tourenq, C., 1990. Granulats. Ed. Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées. 717p.
21. Atis, D.C., Karahan, O., 2009. Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete. *Construction and Building Materials* 23, 392-399.

B

22. Balaguru, P., Ramakrishnan, V., 1987. Comparison of Slump Cone and V-B Tests as Measures of Workability for Fiber Reinforced and Plain Concrete. *ASTM Journal, Cement, Concrete and Aggregates* 9, 3-11.
23. Balaguru, P., Ramakrishnan, V., 1988. Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability Behavior Under Long Term Loading and Air-Void Characteristics. *ACI Materials Journal* 85(3), 189-196.
24. Baron, J., Ollivier, J. P., 1996. Les bétons, bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles, Paris. 522p.
25. Barr, B., Hoseinian, S.B., Beygi, M.A., 2003. Shrinkage of concrete stored in natural environments. *Cement and Concrete Composites* 25, 19-29.
26. Beaudoin, J.J., 1982. Béton renforcé de fibres. Institut de recherche en construction (IRC). Conseil National de Recherche. Canada, p04.
27. Beddar, M., Belagraa, L., 2003. Technical Note Influence of fibrous waste addition on the shrinkage of mortars. *Asian Journal of Civil Engineering* 4, 65-72.

28. Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M.M., Bali, A., Quéneudec, M., 2007. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. *Construction and Building Materials* 21, 662-668.
29. Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M.M., Bali, A., Quéneudec, M., 2009. Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials* 23, 1311-1315.
30. Belferrag, A., Kriker, A., Khenfer, E., 2007. Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les matériaux de constructions en zones sahariennes. *Annales de la Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur* 1, 6-12.
31. Belferrag, A., Kriker, A., Khenfer, M.E., 2013. Improvement of the compressive strength of mortar in the arid climates by valorization of dune sand and pneumatic waste metal fibers. *Construction and Building Materials* 40, 847-853.
32. Belferrag, A., Kriker, A., Abboudi, S., Tié Bi, S., 2016. Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates. *Journal of Cleaner Production* 112, 3048-3056.
33. Benaissa, A., Morlier, P., Tram V., 1992. Le béton de sable un matériau non fissurant. *Algérie équipement* 06, 7-10.
34. Bentalha, M., Houari, H., 2007. Étude du comportement des matrices cimentaires renforcées de fibres métalliques sous chargement monotone croissant. *Sciences & Technologies* 25, 51-58.
35. 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, pp.116.
36. Bosiljkov, V.B., 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research* 33, 1279-1286.
37. Bouaziz, A., Hamzaoui, R., Rezigue, S., Bennabi, A., 2013. Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons. 31^{èmes} Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan.
38. Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., Amziane, S., 2010. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials* 24, 1664-1671.
39. Bouziani, T., Bederina, M., Hadjoudja, M., 2012. Effect of Dune Sand on the Properties of Flowing Sand-Concrete (FSC). *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6, 59-64.

C

40. Casanova, P., 1996. Béton renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Série ouvrages d'art OA., 20.
41. Caverzan, A., Colombo, M., di Prisco, M., Rivolta, B., 2015. High performance steel fibre reinforced concrete: residual behaviour at high temperature. *Materials and Structures* 48: 3317-3329.
42. Centonze, G., Leone, M., Aiello, M.A., 2012. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials* 36, 46-57.
43. Chaalal, O., 1995. Contribution à l'étude de durabilité des tiges en fibres de verre comme armature à béton. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)* 199, 1-12.
44. Chaalal, O., Benmokrane, B., 1995. Contribution à l'étude de la durabilité des tiges en fibres de verre comme armature à béton. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC)* 199, 43-54.
45. Chang Guo, Y., Zhang, J.H., Chen, G.M., Xie, Z.H., 2014. Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production* 72, 193-203.
46. Chanvillard, G., 1993. Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'aciers tréfilées ancrés dans une matrice cimentaire. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Série ouvrages d'art 12, 197p.
47. Chanvillard, G., Basuyaux O., 1996. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 205, 49-63.
48. Chauvin, J.J., Grimaldi G., 1988. Les bétons de sable. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 157, 9-15.
49. Chen, B., Liu, J., 2004. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research* 34, 1259-1263.
50. Chen, B., Liu, J., 2005. Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research* 35, 913-917.

51. Chern, J.C., Young, C.H., 1989. Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 11, 205-214.
52. CIM béton, 2009. Histoire du béton : naissance et développement, 1818-1970.
53. Colombo, M., di Prisco, M., Felicetti, R., 2010. Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures. *Materials and Structures* 43: 475-491.
54. Corinaldesi, V., Moriconi, G., 2004. Durable fiber reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 249-254.
55. Costa, C., 2015. Hydraulic Binders, in: Gonçalves, M. C., Margarido, F. (Eds.), *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 1-52.
56. CSTB, 2014. Avis Technique 3/06-461 Annule et remplace l'Avis Technique 3/03-408 Version corrigée du 10 janvier 2007. Dallages DRAMIX DMB Titulaire : Société BEKAERT France. Dallages de maisons individuelles, en béton renforcé de fibres métalliques.

D

57. Dawood, E.T., Ramli, M., 2012. Evolution of Durable High-Strength Flowable Mortar Reinforced with Hybrid Fibbers. *ISRN Civil Engineering* 1, 1-10.
58. Debicki, G., 1988. Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistances et la fissuration des matériaux. Thèse de doctorat. Université de Lyon.
59. Dehousse, N., Lejeune A., Cuyens T., 1974. Les mortiers et les bétons renforcés de fibres d'aciers. *CSTS Revue* 2, 2-14.
60. de Larrard, F., 1993. Optimization of high-performance concrete, in: *Proceedings of the international conference on micromechanics of concrete and cementitious composites*, 03/09 - 03/10/93. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, p. 45.
61. de Larrard, F., 2002. *Construire en béton : l'essentiel sur les matériaux*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 192 p.
62. de Rivaz, B., 2006. Les performances techniques des bétons renforcés de fibres métalliques et polymères. *Tunnels et ouvrages souterrains* 198, 367-371.
63. de Rivaz, B., 2008. Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining. *World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety-India*.

64. Djebali, S., 2013. Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri Tizi-Ouzou. 182p.
65. Do Thi, Vi Vi., 2011. Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non. Thèse de doctorat. Université de Grenoble. 189 p.
66. Dreux, G., Festa J., 1998. Nouveau guide du béton et ses constituants, Huitième Ed. Eyrolles. 416p.
67. Dupain, R., Lanchon, R., Saint Arroman, J.C., 2000 .Granulats, sols, ciments et bétons - caractérisation des matériaux de génie civil par les essais laboratoire, 2nd ed. Casteilla, Paris. 240p.

E

68. Edgington, J., Hannant, D.J., Williams, R.I.T., 1974. Steel fiber reinforced concrete. Current Paper CP69074, Building Research Establishment, Garston, Watford, 17 pp.
69. El Euch Khay, S., Neji, J., Loulizi, A., 2010. Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements. *Construction and Building Materials* 24, 1790-1795.
70. EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques -. Avril 2006.
71. Ernst, Young, 2014. Observatoire de la filière pneumatique usagée. Rapport annuel de la mise en œuvre des dispositions réglementaires relatives aux pneumatiques usagés, situation en 2013. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME.

F

72. Fauteux, E., Fortin S., 2002. Le béton de sable appliqué aux chaussées routières, Infrastructures, Montréal. CERIU 9(5).
73. Felekoglu, B., 2007. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case), *Resources, Conservation and Recycling* 51(4), 770-791.
74. Fiche de Qualité .Ciment CPJ – CEM II / 32.5A. Conformément à la norme NA 442, Edition, 2000.
75. Kind-Barkauskas, F., Polonyi, S., Kauhsen, B., Brandt, J., 2006. Construire en béton : Concept des bâtiments en béton armé. Presses Polytechniques et Universitaires Romances. Ed. Detail.
76. Kodur, V.K.R., Harmathy, T.Z., 2016. Properties of building materials, in: Hurley, M.J., Gottuk, D.T., Hall Jr., J.R., Harada, K., Kuligowski, E.D., Puchovsky, M., Torero, J.L., Watts Jr., J.M., Wieczorek, C.J. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, fifth edition. Springer-Verlag New York, pp. 277-324.

G

77. Gencil, O., Brostow, W., Datashvili, T., Thedford, M., 2011. Workability and Mechanical Performance of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete with Fly Ash. *Composite Interfaces* 18, 169-184.
78. Giaccio, G.M., Zerbino, R.L., 2005. Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 38, 335-342.
79. Gorisse, F., 1978. *Essai et contrôle des bétons*. Edition Eyrolles, Paris.
80. Guettala, S., Mezghiche B., 2011. Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Construction and Building Materials* 25:1263–1269.
81. Gu, X., Jin, X., Zhou, Y., 2016. *Basic Principles of Concrete Structures*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Tongji University Press. 606p.
82. Granitex nouveau produit "Adjuvant du béton", Oct. 1999.
83. Grzybowski, M., Shah, S.P., 1990. Shrinkage of fibre reinforced concrete. *ACI Material Journal* 87 (2), 138-48.

H

84. Hamidi, B., Koohdaragh, M., 2011. Effect of Application of Microsilis, Steel Fibers and Different Type Bars and Aggregate size on concrete compressive force. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences* 5(12), 2600-2605.
85. Haouari, H., 1993. *Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques*", Thèse de doctorat, INSA Lyon, France.
86. Holschemacher, K., Mueller, T., Ribakov, Y., 2010. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design* 31, 2604-2615.
87. Hsie, M., Chijen, T., Song, P.S., 2008. Materials Science and Engineering Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Mater Science and Engineering A*. 494, 153-157.

J

88. Ji, T., Yi Chen, C., Zhuang, Y.Z., 2012. Evaluation method for cracking resistant behavior of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials* 28, 45-49.

K

89. Kaklauskas, G., Gribniak, V., Bacinskas, D., Vainiunas, P., 2009. Shrinkage influence on tension stiffening in concrete members. *Engineering Structures* 31(6), 1305-1312.

90. Kind-Barkauskas, F., Polónyi, S., Kauhsen, B., Brandt, J., 2006. Construire en béton: conception des bâtiments en béton armé. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 296p.
91. Kobayashi, K., 1983. Development of fibre reinforced concrete in Japan. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 5(1), 27-40.
92. Köksal, F., Altun, F., Yigit, I., Sahin, Y., 2008. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials* 22, 1874-1880.
93. Kriker, A., 2005. Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climats chaud et sec. Thèse de doctorat d'état, ENP, Algérie.
94. Kriker, A., Debicki, G., Bali, A., Khenfer, M.M., Chabannet, M., 2005. Mechanical properties of date palm fibres and reinforced date palm fibre concrete in hot-dry climate. *Cement and Concrete Composites* 27, 554-564.
95. Kumaran, G.S., Mushule, N., Lakshmipathy, M., 2008. A Review on construction technologies that enables environmental protection: rubberized concrete, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 1 (1): 40-44.
96. Kurdowski, W., 2014. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer Science Business Media B.V. 700p.

L

97. Leemann, A., Lura, P., 2014. Creep and Shrinkage of SCC, in: Kamal H. Khayat Geert De Schutter (Eds.), *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. RILEM Technical Committee 228-MPS PP, pp.73-94.
98. Lim, T.Y., Paramshivam, P., Lee, S.L., 1987. Bending behaviour of steel fiber concrete beams. *ACI, Structural journal* 84, 524-536.
99. Li, G., Garricka, G., Eggers, J., Abadie, C., Stubblefield, M.A., Pang, S.S., 2004a. Waste tire fiber modified concrete. *Composites* 35, 305-312.
100. Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B., 2004b. Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 2283-2289.
101. Löfgren, I., 2005. *Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction*, CHALMERS University of technology.

102. Luo, X., Sun W., Chan SYN., 2001. Steel fiber reinforced high-performance concrete: a study on the mechanical properties and resistance against impact. *Materials and Structures* 34,144-9.
103. Luo, F.J., He, L., Pan, Z., Duan, W.H., Zhao, X.L., Collins, F., 2013. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand. *Construction and Building Materials* 47, 131-137.

M

104. Mahmoud, T., 2005. Etude de matériaux minéraux renforcés par des fibres organiques en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts. Thèse de Doctorat, institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
105. Managat, E.S., Azari, M.M., 1984. Theory of the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices. *Journal of Material Science* 19, 2183-2194.
106. Managat, P.S., Azzari M., 1988. Shrinkage of steel fiber reinforced cement composite. *Material and structures* 21, 163-171.
107. Marar, K., Eren, Ö., Yitmen, İ., 2011. Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC). *Materials Research* 14(2), 239-247.
108. Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M.R., Al-Mehthel, M.H., 2013. Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete. *Construction and Building Materials* 41, 634-641.
109. Mesbah, H.A., Buyle-Bodin, F., 1999. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. *Construction and Building Materials* 13, 439-447.
110. Meyer, C., 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites* 31, 601-605.
111. Mihashi, H., de B. Leite, J.P., Kawamata, A., 2004. Multi-mechanism design concept for developing highly ductile cementitious composites, in: di Prisco, M., Felicetti, R., et Plizzari, G.A. (Eds.), proceedings of the Symposium on fibre-Reinforced Concrete (FRC) - BEFIB 2004, 6th RILEM, 20-22 Septembre 2004, Varenna, Italy, pp.515-525.
112. Mimouni, M., 1994. Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction. *Algérie équipement* 15, 2-7.
113. Moens, J.E.C., 1976. Steel fiber concrete mixt proportioning. A.C.I convention Philadelphie.

114. Mohod, M. V., 2012. Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete. *International Journal of Engineering and Science* 1, 1-4.
115. Müller, H.S., Haist, M., 2009. Concrete. In: *Structural concrete Textbook on behaviour, design and performance*, Volume 1, fib Bulletin 51, pp. 95-149.
116. Murali, G., Santhi, A. S., Mohan Ganesh, G., 2014. Effect of Crimped and Hooked End Steel Fibres on the Impact Resistance of Concrete. *Journal of Applied Science and Engineering* 17(3), 259-266.

N

117. Neves, R.D., de Almeida J.C.O., 2005. Compressive behavior of steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete* 6 (1), 1-8.
118. Neville, A., M., 2000. *Propriétés des bétons*. Editions Eyrolles, Paris. 824 pages.
119. NF P 18-301. Normes française "Granulats" Granulats naturels pour bétons hydrauliques. Homologuée décembre 1983.
120. NF P 18-452. Bétons-Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres (Indice de classement : P18-452). Mai 1988.
121. NF P 18-101. Normes française "Granulats" Définitions et classifications. Expérimentale .décembre 1990.
122. NF P 18-555. Normes française «Mesure des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables ». décembre 1990.
123. NF P 18-560. Norme française « Analyse granulométrique ». septembre 1990.
124. NF P 18-598. Normes française « Equivalent de sable». octobre 1991.
125. NF P15-433.Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement. Février 1994.
126. NF P 18-500. Béton-Béton de sable. Juin 1995.
127. NF EN 12350-5. Essai de l'étalement à la table à secousse (Flow test). Juin 2009.
128. NF EN 12350-3. Essai pour béton frais-essai Vébé. Avril 2012.
129. NF EN 934-2+A1. Adjuvant pour béton, mortiers et coulis. Août 2012.
130. Nguyen, T.H., Toumi, A., Turatsinze, A., 2010. Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberized cement-based mortars. *Materials and Design* 31, 641-647.

O

131. Olivito, R.S., Zuccarello, F.A., 2010. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering* 41, 246-255.

P

132. Papakonstantinou, C.G., Tobolski, M.J., 2006. Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete. *Cement and Concrete Research* 36, 1686-1691.
133. Pawade Prashant, Y., Nagarnaik P.B., Pande, A.M., 2011. Influence of Silica fume in enhancement of compressive strength, flexural strength of steel fibers concrete and their relationship. *International Journal of Civil and Structural Engineering* 2(1), 43-55.
134. PENPC, 1994. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées "Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation ", France.
135. Petrus, C., Ismail, R., Zakwa, F. A. A., Marzuki, N. A., Hashim, N.H., Fadillah, K.I., 2014. The Effect of Steel Fibre on Flexural Strength of Fibre Reinforced Concrete at High Temperature, in: Hassan, R., Yusoff, M., Ismail, Z., Amin, N.M., Fadzil, M.A. (Eds.), *InCIEC 2013*. Springer Science Business Media, Singapore, pp. 721-729.
136. Pihlajavaara, S.E., 1977. Carbonation -An Important Effect on the Surfaces of Cement Based Materials. RILEM/ASTM/CIB Symposium on Evaluation of the Performance of External Vertical Surfaces of Buildings. Paper No. 9, Otaniemi, Espoo, Finland, 9 pp.
137. Points68, 2014: <http://points68.clutorop.net/index/page/id/1395323082>.
138. Product data sheets, 2008. « Novocon® FE0730 », Propex Concrete Systems Corp, USA.

R

139. Reed, P., Schoonees, K., Salmond, J., 2008. Historic concrete structures in New Zealand: overview, maintenance and management. Department of Conservation, Wellington. 90 p.
140. Rossi, P., Acker, P., Malier, Y., 1987. Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure. *Materials and structures* 20, 436-439.
141. Rossi, P., Harrouche N., Belloc, A., 1989a. Méthode de composition des bétons de fibres métalliques. *Annales de L'I.T.B.T.P.* 475, 37-43.
142. Rossi, P., Harrouche, N., Le Maou, F., 1989b. Comportement mécaniques des Bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint. *Annales de L'I.T.B.T.P. série matériaux* 479, 167-182.
143. Rossi P., 1992. Mechanical Behaviour of Metal-fibre Reinforced Concretes. *Cement & Concrete Composites* 14, 3-16.
144. Rossi, P., 1994. Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of french research. *ACI Materials Journal* 91, 273-279.
145. Rossi, P., Renwez S., Belloc A., 1995a. Les bétons de fibres à ultra-hautes performances. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.* 196, 61-66.

146. Rossi, P., Casanova P., Renwez S., 1995b. Les bétons fibrés à hautes performances des matériaux d'avenir? Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. 197, 19-23.
147. Rossi, P., 1998. Les bétons de fibres métalliques. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris. 309p.
148. Rossi, P., 2009. Fibres métalliques ou fibres synthétiques. Revue Bétons 21.

S

149. Sablocrete, 1994. Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. 235 pages.
150. Samanci, A., 2012. Fracture behaviour of woven steel fiber reinforced and sand particle filled polymer composites. *Construction and Building Materials* 26, 167-171.
151. Senthil Kumaran, G., Mushule, N., Lakshmiathy, M.A., 2008. Review on Construction Technologies that Enables Environmental Protection: Rubberized Concrete. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 1, 40-44.
152. Shulman, V.L., 2004. Tyre recycling. Ismithers Rapra Publishing. Rapra review reports 15(7). 129 p.
153. Shulman, V.L., 2011. Tyre recycling, in: Letcher, T.M., Vallero, D.A. (Eds.), *Waste: A Handbook for Management*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 297-320.
154. Siddique, R., Kunal, G. K., 2016. Strength and permeation properties of self-compacting concrete containing fly ash and hooked steel fibres. *Construction and Building Materials* 103, 15-22.
155. Sounthararajan, V.M., Sivakumar, A., 2013. Drying shrinkage properties of accelerated flyash cement concrete reinforced with hooked steel fibres. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 8, 77-85.
156. Sun, W., Chen, H., Luo, X., Qian, H., 2001. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 31, 595-601.
157. Swamy, R.N., Managat, R.S., 1974. Influence of fiber geometries on the properties of steel fiber reinforced concrete. *Cement and concrete research* 4, 451-465.
158. Swamy, R.N., Stavrides, H., 1979. Influence of fibre reinforcement on restrained shrinkage and cracking. *ACI Journal* 76(3), 443-60.
159. Swamy, R.N., Al-Ta'an, S.A., 1981. Deformation and ultimate strength in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete. *ACI journal* 78(5), 395-405.

T

160. Tafraoui, A., 2009. Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Application aux nouveaux bétons. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, France.
161. Turatsinze, A., Bonneta, S., Granju, J. L., 2005. Mechanical characterisation of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment* 40, 221-226.

U

162. Urquhart, D., 2013. Historic Concrete Part 1: History and Development. Short Guide 5. Edinburgh: Historic Scotland. <http://conservation.historic-scotland.gov.uk/historicconcrete-short-guide.pdf>

V

163. Van Chanh, N., 2005. Steel fiber reinforced concrete, in: Proceedings of the JSCE/VIFCEA Seminar on concrete Engineering, Dec. 8-9, Vietnam, 108-116.
164. Vandewalle, L., 2000. Cracking behaviour of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibers. *Materials and structures* 33(3), 164-170.
165. Venuat, A., 1983. Des fibres pour alléger et renforcer le béton. *Cahier techniques du bâtiment* 58, 59-70.
166. Vieira, M., 2015. Concrete, in: Gonçalves, M.C., Margarido, F. (Eds.), *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer, Switzerland, pp. 185-236.

W

167. Wafa, F.F., 1990. Properties and applications of fiber reinforced concrete. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 2, 49-63.
168. Wu, Z., Shi, C., He, W., Wu, L., 2016. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials* 103, 8-14.

X

169. XP P 18-540. Granulats, définitions, conformités, spécifications. Octobre 1997.
170. XP 18-303. Eau de gâchage pour béton. Août 1999.

Y

171. Yang, J., YuDan, J., HongBin, L., Jian, C., 2007. Mesomechanism of steel fiber reinforcement and toughening of reactive powder concrete. *Science China Technological Sciences* 50(6), 815-32.
172. Yazıcı, Ş., Inan, G., Tabak, V., 2007. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials* 21, 1250-1253.
173. Yoo, D.Y., Yoon, Y.S., Banthia, N., 2015. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites* 64, 84-92.
174. Yun, H.D., Yang, I.S., Kim, S.W., Jeon, E., Choi, C.S., Fukuyama, H., 2007. Mechanical properties of high-performance hybrid-fibre-reinforced cementitious composites (HPHFRCCs). *Magazine of Concrete Research* 59(4), 257-271.

Z

175. Zhang, J., Li, V. C., 2001. Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite. *Journal of engineering mechanics* 127:1(37), 37-44.
176. Zollo, R.F., 1997. Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development. *Cement and Concrete Composite* 19, 107-122.

ANNEXE



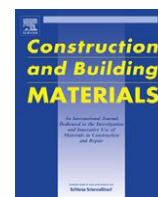
Photo 01: Eprouvettes destinées à la mesure du retrait.



Photo 02 : Béton de sable de dunes renforcé de fibres métalliques issues de pneus usés. Cette coupe transversale montre la répartition des fibres au sein de la matrice.

PUBLICATIONS

Article 1



Improvement of the compressive strength of mortar in the arid climates by valorization of dune sand and pneumatic waste metal fibers

Allaoua Belferrag^{a,b,*}, Abdelouahed Kriker^b, Mohamed Elmouldi Khenfer^c

^aUniversity Mohamed Kheider of Biskra, Algeria

^bUniversity KASDI Merbah of Ouargla, Laboratory of Exploitation and Valorization of Natural Resources in Arid Areas (E.V.R.N.Z.A.), Ouargla 30000, Algeria

^cUniversity Amar Telidji of Laghouat, Algeria

HIGHLIGHTS

- ▶ A new type of metal fibers resulting from pneumatic waste was used to reinforce concrete.
- ▶ Reduction of the materials cost and preservation of the environment by the valorization of dune sand and pneumatic waste.
- ▶ The used fibers had a positive effect on the improvement of the compressive strength.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 1 July 2012

Received in revised form 5 October 2012

Accepted 21 November 2012

Keywords:

Metal fiber
Dune sand
Pneumatic waste
Valorization
Compressive strength

ABSTRACT

In this work we studied the effect of the addition of a new type of metal fibers, resulting from used tires, on the compressive strength of dune sand concrete. This formulation is a contribution to the valorization of the dune sand and used tires, in order to take part in the protection of the environment and reduction of the costs of construction materials.

Three types of fibers were tested, having 30, 40 and 60 mm lengths, and diameters of 0.9, 0.28 and 0.9 mm respectively. The fiber volume fraction in the concrete was 1% and 1.5%. The results obtained show an improvement of the compressive strength for the metal fiber reinforced sand dune concrete (MFSC) compared to the concrete without fibers.

The improvement of the compressive strength of the MFSC mixtures is governed by the size, fiber volume fraction, the bond between fibers and the dune sand concrete, the aspect ratio, and fibers orientation. The maximum of compressive strength was obtained by the introduction of fiber having the highest aspect ratio.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Algeria is among the countries which have an enormous dune sand deposit. However its use in the field of construction is almost insignificant. Recently, there has been a growing interest [1–5] in the utilization of dune sand in the formulation of concrete.

The use of steel fibers provides an improvement of mechanical (strength and shrinkage) properties of concrete. Several studies were carried out on the valorization of new types of fibers having a low cost such as vegetal fibers (sisal, date palm, etc.). In this work, we had the topical idea to use steel fibers obtained from used tires. This type of fiber is characterized by its low cost and its ecological impact, since it consists to valorization of used tires which are an industrial waste available in great quantities.

An improvement in flexural strength of concrete reinforced by pneumatic waste fibers was observed in our previous publication [6].

The addition of fibers in the concrete can also improve the compressive strength. This improvement can be explained by several parameters: the fibers orientation, the quality of concrete and properties of the fibers (type, volume, aspect ratio, etc.).

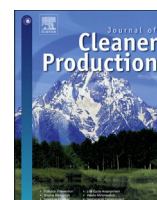
Concerning the behavior of the metal fiber concrete in compression, several studies were carried out; some have observed a reduction in the compressive strength of the metal fiber reinforcement concrete [7–9] compared to a concrete without fibers, except a preferential orientation.

However, other studies have noted an improvement of the compressive strength. Neves and de Almeida [10], have reported that the incorporation of fibers having length of 30 mm, diameter of 0.38 mm and aspect ratio of 80, improve the compressive strength of the composite of more than 9%, while another type of fibers with a length of 30 mm, diameter of 0.55 mm and aspect ratio of

* Corresponding author. Address: BP No. 36, cité Nasser Ouargla, Algeria. Tel.: +213 0772525626; fax: +213 029712627.

E-mail address: belallaoua67@yahoo.fr (A. Belferrag).

Article 11



Effect of granulometric correction of dune sand and pneumatic waste metal fibers on shrinkage of concrete in arid climates



Allaoua Belferrag^{a,b,*}, Abdelouahed Kriker^a, Said Abboudi^c, Salima Tié Bi^c

^a University KASDI Merbah of Ouargla, Laboratory of Exploitation and Valorization of Natural Resources in Arid Areas (E.V.R.N.Z.A.), Ouargla 30 000, Algeria

^b University Mohamed Kheider of Biskra, Algeria

^c IRTES-M3M, UTBM, site de Sévenans, 90010 Belfort Cedex, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 March 2015

Received in revised form

15 October 2015

Accepted 3 November 2015

Available online 14 November 2015

Keywords:

Valorization

Dune sand

River sand

Pneumatic waste metal fiber

Shrinkage

Granulometric correction

ABSTRACT

This paper reports result of a study conducted to investigate the effect of granulometric correction of dune sand and addition of pneumatic waste metal fibers on the drying shrinkage of dune sand concrete. Valorization of these materials provides both economic and environmental advantages.

A correction of the granulometry of dune sand (DS) by river sand (RS) was undertaken with the proportions of 50% DS + 50% RS and 40% DS + 60% RS. Two types of fibers f_1 ($l_f = 20$, $d = 0.28$ mm) and f_2 ($l_f = 30$, $d = 0.28$ mm) with l/d ratios of respectively 71.43 and 107.14 were incorporated with volume fractions of 0.5% and 1%.

For the sands obtained from mixing DS and RS, an improvement of fineness modulus of dune sand, and the sand equivalent of river sand were observed, compared respectively to 100% DS and 100% RS. The granulometric correction of dune sand and the addition of fibers reduced the drying shrinkage. The maximum of shrinkage reduction was obtained for the mixtures prepared with 40% DS and 60% RS. The fibers having the highest aspect ratio and a volume fraction of 1% presented a more significant effect on drying shrinkage. The more significant reduction of shrinkage was 40.53% compared to concrete without fibers. Weight loss was higher for the fiber reinforced sand concretes compared to plain sand concretes.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The irrational use of natural resources in the construction threatens the environment. The valorization of local materials and industrial wastes can contribute to the reduction of costs and the preservation of the environment. However, these local materials, can present defects requiring treatment or transformations. Several studies (Al-Harthy et al., 2007; Tafraoui, 2009; El Euch Khay et al., 2010; Guettala and Mezghiche, 2011; Abu Seif, 2013a; Abu Seif, 2013b; Belferrag et al., 2013) on dune sand have found that this material exhibits fine granulometry causing a significant shrinkage.

Dune sand is available in large quantities in the south of Algeria, characterized by a hot and dry climate which impacts negatively on the shrinkage of concrete.

In fact, reduced durability of concrete is one of the major problems caused by the hot weather conditions (Maslehuddin et al., 2013).

* Corresponding author. BP N°36 cité Nasser Ouargla, Algeria. Tel.: +213 0772525626; fax: +213 029712627.

E-mail address: belallaoua67@yahoo.fr (A. Belferrag).

According to Barr et al. (2003), shrinkage is a complex phenomenon which is influenced by many factors including the constituents, the temperature and relative humidity of the environment, the age when the concrete is subjected to the drying environment and the size of the structure or member.

The addition of fibers as reinforcement in concrete improves both the mechanical and rheological (shrinkage) properties. The principles of sustainable development and green buildings have penetrated the construction industry at an accelerating rate in recent years (Meyer, 2009). The concrete industry in particular, because of its enormous environmental footprint, has a long way to go to shed its negative image (Meyer, 2009). The hundreds of millions of scrap tires generated each year in developed countries pose a serious environmental problem (Meyer, 2009). According to Thomas et al. (2015), by the year 2030 the number of used tires in the world, would reach 1200 million tires yearly.

Because of the environmental threat associated with the waste tires, their proper disposal has attracted a lot of attention in the last years (Papakonstantinou and Tobolski, 2006). The successful use of waste tire chips and fibers in concrete could provide one of the environmentally responsible and economically viable ways of