



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université KASDI Merbah de Ouargla
Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur
Département d'hydraulique et Génie Civil

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**
Filière : **Aménagement Hydraulique et Génie Civil**
Option : **Génie Civil**

Par :
BELFERRAG Allaoua

Thème :

**Valorisation des fibres métalliques issues des déchets
pneumatiques dans les bétons de sable de dunes**

Soutenu publiquement le : 20/06/2006

Devant le Jury composé de :

BEBBA Ahmed	M.C	Université de Ouargla	Président
BENTEBBA Mohamed Tahar	M.C	Université de Ouargla	Examineur
GOUAL Mohamed Sayeh	M.C	Université de Laghouat	Examineur
KRIKER Abdelouahed	M.C	Université de Ouargla	Promoteur
KHENFER Mohamed Mouldi	Prof	Université de Laghouat	Co-Promoteur

Dédicace

A ma famille

A ma promos

A tous mes amis

Remerciements

"L'évolution de la science est le remplacement d'une erreur par une autre erreur de moins en moins absurde".

Dire que nous combattions l'erreur mais en contraire nous l'affirmons jour après jour avec acharnement, enfin à travers ce périple on se rend compte que nous sommes qu'un maillon d'une chaîne infinie, acceptons alors que quoique nous fassions notre travail ne peut être que modeste, sur ce je tiens à présenter mes remerciements et ma gratitude à mon promoteur KRIKER A/elouahed, qui a su montrer une grande patience durant et après le déroulement des travaux, et aussi pour ses conseils très constructives tout le long de la période de mémoire.

Je remercie mon co-promoteur Monsieur KHENFER Mohamed Mouldi, professeur à l'université de Laghouat, pour ses conseils et ses directives.

Je remercie très vivement Monsieur BEBBA A., Maître de Conférences à l'université de Ouargla, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Il m'est agréable de remercier Messieurs BENTEBBA Mohamed Tahar, Maître de conférences à l'université de Ouargla qui a accepté d'examiner mes travaux, et de participer à ce jury, je lui en suis très profondément reconnaissant.

Mes remerciements aussi pour Monsieur GOUAL Mohamed Sayah, Maître de conférences à l'université de Laghouat, qui m'a fait le grand honneur d'examiner mes travaux et de faire part de ce jury, je lui en suis reconnaissant pour l'intérêt qu'il a voulu porter à ce travail.

C'est bien volontiers que je remercie mes amis TAMENE Y. et BOUAROUDJ E. pour leurs soutiens et aides. Je remercie aussi ZENKHRI A. pour son aide durant le déroulement des expériences, M^{elle} YUCEF F. et M^{elle} SLIMANI R. pour leurs encouragements et leurs aides dans l'utilisation du matériel informatique.

Je n'oublie surtout pas mon frère HAMID pour son soutien sans condition, morale et financier.

Enfin, mes remerciements aussi à l'ensemble des membres du laboratoire (EVRNZA), et à tout qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire.

Résumé

Les matériaux à base de ciment, en l'occurrence le béton ou le mortier classique résistent mal à la traction. Cette fragilité s'accroît surtout dans les environnements chauds et secs, telle que les zones sahariennes de notre pays, où les constructions présentent des déficiences en termes de résistances et de fissurations à cause de l'écart de température, qui sévit dans ces régions. En effet, les constructions dans ces climats sont très fragiles, pour y remédier à ces anomalies, le renforcement des matériaux par des fibres peut offrir des solutions techniques pour améliorer ces performances mécaniques et rhéologiques.

Les régions sahariennes disposent d'énormes gisements en sable de dunes, et comportent des activités industrielles très importantes, sous l'effet de ces activités émane beaucoup de déchets industriels entre autres les pneus usés. Ces déchets pneumatiques sont actuellement exploités d'une manière traditionnelle dans l'alimentation des fours, pour la fabrication de gypse comme source d'énergie, les fibres métalliques issues de cette opération sont laissées à l'abandon dans la nature. L'utilisation de ces déchets comme renfort dans les bétons, peut présenter à la fois, une solution pour améliorer les performances mécaniques et rhéologiques du composite, et aussi un moyen pour la préservation de l'environnement.

L'objectif de cette recherche est une contribution à la valorisation des déchets pneumatiques et de sable de dunes dans le domaine de la construction.

Dans cette étude seront présentées les caractéristiques mécaniques (flexion, compression) et rhéologiques (retrait) des bétons de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés.

Mots clés : Valorisation, Sable de dunes, Fibres Métalliques, Pneus usés, Béton de sable, Béton de fibres, Mortier, Résistances à la flexion, Résistance à la compression, Retrait, Gonflement, Fluage, Durabilité.

Abstract

Materials with base of cement, in occurrence the concrete or the classic mortar resist badly to the traction. This fragility becomes more marked especially in hot dry environments, such as the Saharan zones of our country. The classic concrete in these last environments present deficiencies in term of resistances and cracking, for several climatic conditions. Indeed, constructions in these climates are very fragile. To remedy to these abnormalities, the reinforcement of materials by fibres can offer some technical solutions, to improve these mechanical and rheological performances.

The Saharan regions possess enormous layer of sand dunes, and contain very important industrial activities, under the influence of these activities emanate a lot of industrial waste among others the worn-out tires. This pneumatic waste is at present exploited only in a traditional way in the alimentation of ovens, for the manufacture of plaster, as source of energy, the steel fibres stemming from this operation are neglected in the nature. The use of this waste as reinforcement in concretes can present at the same moment, a suitable solution to improve mechanical and rheological performances of the composite, and means of defense for the environment.

The objective of this search is a contribution to the valorization of the pneumatic waste and the dunes sand in the field of the construction.

In this study will be presented mechanical (flexion, compression) and rheological (shrinkage) characteristics of the dunes sand concretes reinforced by steel fibres stemming from worn-out tires.

Key words: Valorization, Sand of dunes, steel fibers, Worn-out tires, Concrete of sand, Concrete of fibers, Mortar, flexion resistances, Compression resistance, Shrinkage, Swelling, Creep, Durability.

ملخص

المواد التي يكون الاسمنت من أهم مكوناتها، مثل الخرسانة و الملاط تكون لها مقاومة ضعيفة للشد. هذا الضعف يتجلى أكثر في المناطق الحارة و الجافة كالمناطق الصحراوية في بلادنا، أين تتعرض المنشآت إلى انخفاض في المقاومة و ظهور التشققات نتيجة للفارق الحراري الذي يجتاح هذه المناطق. في الواقع، المنشآت في هذه المناخات تكون جد ضعيفة و من اجل علاج هذا المشكل، التدعيم بالألياف يمكن أن يقدم حلا تقنيا يساهم في تحسين الخصائص الميكانيكية و الريولوجية.

تتمتع المناطق الصحراوية بثروات هائلة من رمل الكثبان و تحوي نشاطات صناعية جد هامة، التي يترتب على إثرها عدة بقايا و نفايات صناعية، نذكر من بينها العجلات المستهلكة. هذه البقايا المطاطية تستعمل حاليا، بشكل تقليدي، كمصدر للطاقة في تغذية الأفران الخاصة بصناعة الجبس. أما الألياف المعدنية الناتجة عن هذه العملية تبقى مرمية في الطبيعة. على الرغم من أن استعمالها كمقوي للخرسانة قد يمثل في آن واحد حلا من اجل تحسين خصائصها الميكانيكية و الريولوجية و كذا وسيلة لحماية البيئة.

الهدف من هذا البحث هو المساهمة في تامين نفايات العجلات المطاطية و رمل الكثبان في مجال البناء. في هذه الدراسة سنقوم بعرض الخصائص الميكانيكية(الانحناء ، الضغط) و الريولوجية (التقلص) لخرسانة رمل الكثبان المدعمة بالألياف المعدنية الناتجة عن العجلات المطاطية المستهلكة.

الكلمات المفاتيح: تامين، رمل الكثبان، ألياف معدنية، عجلات مطاطية مستهلكة، خرسانة الرمل، خرسانة الألياف، ملاط، مقاومة الانحناء، مقاومة الضغط، التقلص، الانتفاخ، تشوه تحت إجهاد، الديمومة.

Liste des figures

- Figure I.1.** Les fibres métalliques (formes et dimensions variables).
- Figure II.1.** Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables.
- Figure II.2.** Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables.
- Figure II.3.** Retrait total.
- Figure II.4.** Fluage total.
- Figure II.5.** Influence de la résistance sur le fluage total.
- Figure II.6.** Distribution de la porosité en fonction du rayon de pores.
- Figure II.7.** Brevet établi sur les bétons de fibres par G. MARTIN et W. MEISCHE-SMITH.
- Figure II.8.** Brevet établi sur les bétons de fibres par H. ETHERIDGE.
- Figure II.9.** Brevet établi sur les bétons de fibres par G. CONSTANTINESCO.
- Figure II.10.** Détermination du rapport S/G optimal.
- Figure II.11.** Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration.
- Figure II.12.** Comportement des BFM à la compression en fonction du volume et du type de fibre.
- Figure II.13.** Retrait de dessiccation après durcissement du béton sans et avec 0.5% de fibre de fonte.
- Figure II.14.** Retrait de dessiccation après durcissement du béton sans et avec 1% de fibre de fonte.
- Figure II.15.** Déformations différées sous compression du béton sans et avec 0.5% de fibre de fonte.
- Figure II.16.** Déformations différées sous compression du béton sans et avec 1% de fibre de fonte.
- Figure III.1.** Dispositif de l'essai d'équivalent de sable.
- Figure III.2.** Courbe granulométrique de sable de dune.
- Figure III.3.** Force de rupture en traction pour FM de $D_1=0.9\text{mm}$ en fonction de la longueur.
- Figure III.4.** Courbe (contrainte-déformation) en traction pour FM de $D_1=0.9\text{mm}$.
- Figure III.5.** Force de rupture en traction pour FM de $D_2=0.28\text{mm}$ en fonction de la longueur.
- Figure III.6.** Courbe (contrainte-déformation) en traction pour FM de $D_2=0.28\text{mm}$.
- Figure III.7.** Table à secousses (Flow test).
- Figure III.8.** Dispositif de l'essai de VÉBé.
- Figure III.9.** Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage de super plastifiant.
- Figure IV.1.** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3point).
- Figure IV.2.** Dispositif de rupture en compression.
- Figure IV.3.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.4.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.5.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.6.** Détail d'une fissure.
- Figure IV.7.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CRS, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.

- Figure IV.8.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CRS, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.9.** Variation de la résistance à la flexion du BSFM (CRS, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.10.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CPJ, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.11.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.12.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.13.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CRS, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.14.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CRS, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.15.** Variation de la résistance à la compression du BSFM (CRS, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.16.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.17.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.18.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.19.** Variation du gonflement-retrait du BSFM (CPJ, $L_f=30\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.20.** Variation du gonflement-retrait du BSFM (CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.21.** Variation du gonflement-retrait du BSFM (CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge.
- Figure IV.22.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=30\text{mm}$) en fonction de perte en poids.
- Figure IV.23.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction de perte en poids.
- Figure IV.24.** Variation du retrait du BSFM (CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction de perte en poids.

Liste des tableaux

- Tableau I .1.** Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres d’amiantes.
- Tableau I .2.** Caractéristiques de fibres de carbone.
- Tableau I .3.** Différent types de verres fiabes.
- Tableau I .4.** Caractéristiques physiques et mécaniques de fibres de verres.
- Tableau I .5(a).** Caractéristiques physiques et mécaniques de fibres végétales les plus Utilisées.
- Tableau I .5(b).** Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.
- Tableau I .6.** Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret.
- Tableau I .7.** Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex.
- Tableau I .8.** Caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte amorphe.
- Tableau I .9.** Composition moyenne d’un pneu VL en europe.
- Tableau I .10.** Caractéristiques physiques d’un pneu.
-
- Tableau II.1.** Relation entre la granularité et le dosage en ciment.
- Tableau II.2.** Formation, fabrication et forme commerciale de quelques fluidifiants.
- Tableau II.3.** Composition des bétons de sable de dunes pour 1m^3 .
- Tableau II.4.** Dosages et résistances à la traction des bétons de sable de dunes
- Tableau II.5.** Composition des bétons de fibres métalliques pour 1m^3 .
- Tableau II.6.** Composition d’un béton de fibres d’acier.
- Tableau II.7.** Résistance à la compression d’un béton renforcé de fibres métalliques.
- Tableau II.8.** Résistance en flexion du béton de fibres partiellement orientées.
-
- Tableau III.1.** Résultats moyens d’analyse granulométrique de sable de dunes.
- Tableau III.2.** Composition chimique du ciment en %.
- Tableau III.3.** Analyse minéralogique du clinker.
- Tableau III.4.** Composition chimique de l’eau.
- Tableau III.5.** Caractéristiques des plastifiants, réducteur d’eau et super plastifiant.
- Tableau III.6.** Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres ($L_f=30$ et 60mm).
- Tableau III.7.** Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre ($L_f=40\text{mm}$).
- Tableau III.8.** Étalement en (%) et en (cm) du béton de sable de dunes.
- Tableau III.9.** Composition du béton de sable renforcé de fibres métalliques (1m^3).

Tableau IV.1. Résistance à la flexion du BSFM en ciment (CPJ 32.5).

Tableau IV.2. Résistance à la flexion du BSFM en ciment (CRS 42.5).

Tableau IV.3. Résistance à la compression du BSFM en ciment (CPJ 32.5).

Tableau IV.4. Résistance à la compression du BSFM en ciment (CRS 42.5).

Tableau IV.5. Résultats du retrait (1^{er} mode).

Tableau IV.6. Résultats du gonflement-retrait (2^{ème} mode).

Tableau IV.7. Résultats de la perte en poids (2^{ème} mode).

Tableau IV 8. Résultats des pentes.

Liste des photos

Photo I.1. Béton de fibre pour les formes exceptionnelles

Photo I.2. Béton de fibres pour les panneaux décoratifs

Photo I.3. Panneaux légers et colorés en béton de fibres de verre

Photo II.1. Phare de Port Saïd

Photo II.2. Métro de Saint Petersburg

Photo III.1. Les fibres. (Annexe)

Photo III.2. (a)- Incinération d'un pneu, (b)- Broyage des pneus. (Annexe)

Photo III. (3,4). Machine d'essai de traction pour fil d'acier. (Annexe)

Photo III. (5,6). Essai VÉBé. (Annexe)

Photo IV. (1,2). Machine d'essai de traction par flexion. (Annexe)

Photo IV. (3,4). Machine d'essai de compression. (Annexe)

Photo IV.5. Essai de retrait (Rétractomètre). (Annexe)

Introduction générale

Le béton est un terme générique, qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sables, graviers) agglomérés par un liant, ce dernier peut être hydraulique (ciment) ou hydrocarboné (bitume). Lorsque les granulats utilisés se réduisent à des sables, on parle alors de béton de sable ou de mortier.

Depuis l'invention du béton, dont les constituants se trouvant en abondance dans la nature, aucun autre matériau n'a pu réellement rivaliser avec lui, en raison de ses nombreuses qualités techniques et économiques. Ces dernières décennies, les domaines d'applications du béton s'élargissent sans cesse et requièrent des voies nouvelles, des matériaux plus performants et mieux adaptés sont de plus en plus utilisés.

Il est évident que le béton présente un handicap de par sa fragilité et sa faible résistance à la traction, c'est pourquoi on lui associe des barres d'aciers dans le but de reprendre les efforts de traction permettant alors de réaliser des éléments fléchis. Toutefois il reste relativement fragile, de ce fait, les constructeurs de par le monde devront se faire de cette situation en cherchant à atténuer ses imperfections. Ainsi plusieurs recherches sont actuellement en cours, afin d'y remédier à ces faiblesses.

La recherche et l'expérience acquise ont permis l'introduction des fibres dans le domaine de la construction, et qui rend la possibilité de produire des éléments minces, plus légers, plus résistants et moins sujets à la fissuration. Par la simple addition d'une quantité de fibres.

Bien avant l'apparition de l'homme l'oiseau à utiliser des matériaux fibrés pour construire son nid, l'exemple le plus éloquent est donné par l'hirondelle, qui en construisant son nid n'hésite pas à utiliser de la boue et des fibres de toutes natures, pour enfin nicher dans les endroits où seul l'esprit de génie le permet. Jadis, nos

ancêtres sont venus en s'inspirant de la nature pour construire leurs demeures en utilisant la terre renforcée par des fibres naturelles, et cela depuis des millénaires.

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel, beaucoup d'ouvrages et de structures témoignent de son existence, depuis au moins un siècle et demi sous l'appellation de "béton aggloméré", qui est l'ancêtre du béton de sable aujourd'hui, plusieurs facteurs font de ce dernier le thème préféré de la majorité des chercheurs à travers le monde, à cause de la rareté des granulats, sa technique d'utilisation facile, son coût réduit, etc.

L'Algérie est parmi les pays du tiers monde qui dispose d'énorme gisement en matériaux tel que le sable de dunes du Sahara, ainsi qu'une grande variété de fibres (métalliques, végétales, polypropylène,...), qui sont peu, voir même non valoriser dans le domaine de la construction.

Récemment quelques recherches ont été réalisées dans le but de valoriser le sable de dunes dans la construction, mais la plus part des chercheurs ont constaté que ce matériau présente quelques anomalies tel que le grand retrait. En parallèle, la majorité des auteurs constatent que l'ajout des fibres de toutes natures au béton ou mortier contribue à la diminution du retrait et à l'augmentation des résistances à la fissuration.

Le but de ce présent travail, est une contribution à la valorisation et au développement des matériaux locaux, à base de sable de dunes et de fibres métalliques dans la région de Ouargla. Et cela, par une récupération d'un déchet industriel (fibres métalliques issues de pneus usés), disponible en grande quantité du fait d'une importante activité industrielle et pétrolière d'une part, et d'autre part une simple utilisation de sable de dunes qui constitue un énorme gisement près de 60% du territoire national. Les déchets de fibres sont utilisés comme ajout afin d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable de dunes. Et tous ça, dans le but d'obtenir un béton à la fois résistant et économique, sans oublier la préservation de l'environnement.

Dans le contexte de l'évolution et du développement durable de la construction, l'objectif de notre travail consiste à étudier les caractéristiques mécaniques (résistance

à la traction et à la compression) et rhéologique (retrait), d'un béton à base de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques issues des pneus usés, afin de déterminer l'évolution des caractéristiques de ce dernier par rapport à un béton témoin (sans fibres).

Le mémoire s'articule sur quatre chapitres :

Après une introduction générale, nous exposons dans le premier chapitre, les différents types de fibres et leurs caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi qu'un aperçu sur les déchets industriels (pneu usés). Cette présentation vise à ressortir les variétés importantes en forme et en nature des fibres, pour enfin pouvoir se situer par rapport au marché de l'industrie du point de vue coût, qualité et disponibilité.

Dans la deuxième partie, nous présentons une synthèse bibliographique qui met en relief l'influence et la position des fibres dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques et rhéologiques des bétons, ainsi que les propriétés des bétons de sable.

La troisième partie, est consacrée à la caractérisation des constituants utilisées dans notre étude. En particulier les fibres métalliques issues des pneus usés, rentrant dans le cadre de valorisation, aussi à la formulation des bétons de sable de dunes avec et sans fibres.

Dans la quatrième et la dernière partie, nous intéressons à l'étude des propriétés mécaniques (flexion, compression) et rhéologique (retrait) des bétons de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques issues de pneus usés, pour pouvoir analyser le comportement de ce matériau, dont l'objectif final est d'établir le bilan de l'influence des fibres sur son comportement.

Enfin nous présentons, quelques conclusions et recommandations pour mieux valoriser ce nouveau matériau dans les constructions notamment dans les zones sahariennes.

Généralités sur les Fibres et Déchets Industriels (pneus usés)

I.1. Introduction :

La mise au point de produits composites renforcés de fibres dans les secteurs de la construction civile ou maritime, dans la fabrication des automobiles, l'aérospatiale et autres a offert l'opportunité de surpasser certaines difficultés qui ont demeurées un obstacle devant l'évolution des caractéristiques, mécaniques ou techniques des matériaux.

Devant cet exploit, les chercheurs de par le monde et jusqu'à aujourd'hui, tentent d'utiliser des fibres de différentes natures et caractéristiques pour parer à certaines anomalies qui demeurent un handicap devant la vulgarisation de leurs utilisations surtout dans le domaine de Génie Civil.

A cet effet, différents types de fibres sont utilisées dans les matériaux de constructions afin de remédier à certaines anomalies, dans le but d'une amélioration des performances mécaniques et rhéologiques de ces derniers.

Mais après tout, cette nouvelle technique doit présenter un défi pour s'imposer dans le monde du marché. Non seulement sur le plan technique, mais en tenant compte de l'économie (coût) qui est un paramètre préférentiel de la majorité des partenaires.

De ce fait, l'idée d'une valorisation des déchets industriels devient nécessaire est inévitable pour produire à la fois des fibres à prix concurrentiels et participer au développement et la protection de l'environnement qui est devenue le souci de toute la planète, notamment pour les pays émergents du tiers monde qui possèdent une multitude de déchets industriels. De ce fait, notre pays L'Algérie est parmi ces pays qui dispose d'énormes gisements en déchets pneumatiques qui peuvent être utilisés dans la production des fibres.

I.2. Les différents catégories de fibres utilisées dans le renforcement des matériaux de constructions :

I.2.1. Introduction :

L'utilisation d'une fibre comme renfort au sein d'une matrice, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (béton, béton de sable ou mortier). Sans toutefois ignorer le facteur économique (coût), qui est très important dans la mesure où le prix des fibres sur le marché est relativement élevé par rapport aux armatures traditionnelles.

La variété dans la nature et la forme des fibres, fait que ces derniers présentent des caractéristiques différentes les uns des autres, selon les objectifs recherchés on peut faire la distinction entre les fibres possédant des résistances élevées (fibres de verres, d'acier, de carbone, d'amiante) et les fibres possédant des résistances faibles (fibres végétales, propylène ...).

Plusieurs variétés de fibres sont actuellement sur le marché selon leurs natures et leurs caractéristiques; on les trouve sous des formes et des dimensions diverses. Parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des matériaux du Génie Civil et les Travaux Publics on peut citer :

Les fibres de polypropylène, d'amiante, de carbone, de verres, les fibres végétales et métalliques.

I.2.2. Les fibres de polypropylènes :

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines, découvert en 1954. Ils sont obtenus suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre les propriétés mécaniques élevées. [1]

Ces fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui une fois introduits dans le matériau se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus

courantes varient de 10 à 15 mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns, leurs masse volumique est d'environ 0.9 kg/dm^3 et leur résistance à la traction est sensiblement le quart de celle des fibres métallique. [2]

Les fibres de polypropylènes 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. [3]



Photo I.1- Bétons de fibres pour des formes exceptionnelles [4]

Les études menées avec ce type de fibres ont montré que ce matériau présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verres. [1]

I.2.3. Les fibres d'amiantes :

Ce sont des silicates hydratés de magnésium, parfaitement compatible avec la pâte de ciment, elle possède une bonne résistance à la traction est un module d'élasticité élevé, ce sont des fibres bon marchés.

Mais ces derniers présentent un inconvénient, ils se repartissent difficilement dans les mortiers et les bétons. [1]

Ils sont surtout utilisés dans la fabrication de voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et de protection contre le feu, tuyaux d'égouts, plaque de toitures plates et ondulées, revêtement de mur. Les caractéristiques des fibres d'amiantes sont résumées dans le tableau (I.1) [3]

Tableau I .1- caractéristiques physiques et mécaniques des fibres d'amiantes [3]

Fibre	Diamètre en μm	Densité	Allongement de rupture en%	Module d'élasticité en (GPA)	Résistance en tract (GPA)
amiante	0.02-20	2.5-3.4	2.3	200	3

Des études récentes ont conclu que l'utilisation des fibres d'amiante, présente un sérieux danger pour la santé humaine et l'environnement. A cet effet l'utilisation de ses derniers sont de plus en plus abandonnées voir interdite. [5]

I.2.4. Les fibres de carbone :

Les fibres de carbone forment une grande variété, elles sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur (fibres orientées et réticulées). Suivant l'origine de ce dernier, on distingue les fibres de carbone élaborées à partir de :

a) Fibres acrylique :

Connu sous divers noms commerciaux (crylor, courtelle, dralon,...).

b) Précurseur brai :

Résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille [6]

Leurs inconvénients majeurs résident dans leurs fragilités et leurs coûts élevés. Toutefois, les fibres de carbone noyées dans la matrice cimentaires sont inertes et confèrent au composite d'excellentes propriétés (facilité de finition, bonne résistance thermique et mécanique, ...), de plus l'un des grands avantages des fibres de carbone est leur faible dimension. Qui offre la possibilité de fabriquer des composites ayant une haute teneur en fibres. [7] Les caractéristiques des fibres de carbone sont résumées dans le tableau (I.2).

Tableau I. 2- caractéristiques de fibres de carbone [6]

caractéristiques	Carbone HR	Carbone HM	Carbone THM	Carbone HM(brai)
Masse volumique (Kg/m ³)	1750	1810	1950	2000
Diamètre en (µm)	5 à 7	5 à 7	5 à 7	12
Module de Young en (GPa)	230	400	600	280
Contrainte à la rupture en (MPa)	3000-4000	2800	2000	2000-2400

HR : haute résistance ;

HM : haut module d'Young ;

THM: très haute module d'Young ;

HM (brai) : haut module à base de brai ;

I.2.5. Les fibres de verres :

Les fibres de verres sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées à 1250°C. A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices. Il sont produits à partir d'un verre filable appelé verre textile composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performance/prix qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. [6]

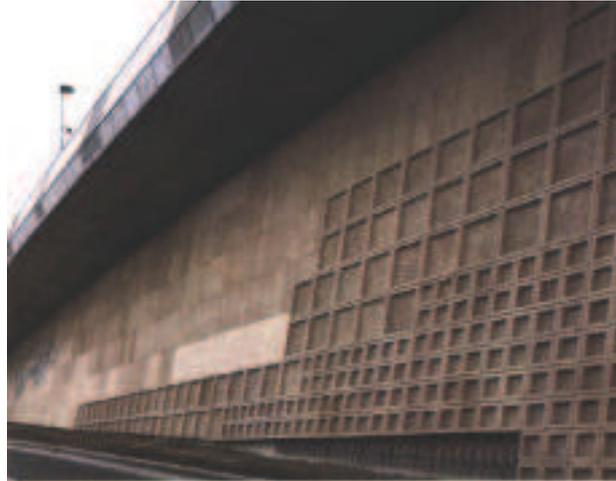


Photo I. 2 - Bétons de fibres pour des panneaux décoratifs [4]

Tableau I. 3- différent types de verres filables [6]

Types	Caractéristiques générales
E	A usage général ; bonne propriétés électriques
D	Haute propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R.S	Haute résistance mécanique

Mais il faut signaler que l'action corrosive des alcalins contenue dans le ciment sur les fibres de verres (problème de durabilité), malheureusement influe directement est d'une manière rapide sur les caractéristiques mécaniques des mortiers de fibres de verres, et provoque des microfissurations dues au phénomène de fluage. [8]

A cet effet, les fibres de verre pour pouvoir être utilisées dans le béton doivent subir soit un traitement par ensimage, soit être protégées au moment de leur emploi par ajout dans la gâchée de polymères, soit enfin avoir été fabriquées avec un verre de zirconium cette dernière solution étant la plus pratique. [2]

Dans ce même contexte des recherches ont été entreprises pour empêcher l'attaque chimique du verre, en fabricant des fibres de verre E revêtues par imprégnation d'une

résine thermoplastique; ainsi un verre résistant aux alcalins à été développé en Angleterre par la B.R.E (Building Research Establishment). Ce verre se différencie du verre à vitre sodo-calcique et du verre E par son enrichissement en Zircône. Les études effectives ont montré que ce verre était très résistant aux alcalins et qu'il convenait parfaitement pour renforcer le béton. [1]

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 (quelque dizaine de microns), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. [6]

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 [3]. Les caractéristiques des fibres de verre sont résumées dans le tableau I .4-



Photo I.3- panneaux légers et colorés en béton de fibres de verre [4]

Tableau I .4- caractéristiques physiques et mécaniques de fibres de verres [3]

Fibre	Diamètre en μm	densité	Allongement de rupture en%	Module d'élasticité en (GPa)	Résistance en traction(GPa)
verre	5-500	2.4	2-3.5	80	2-3

I.2.6. Les 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.

Il existe une grande variété de fibres végétales dont on peut citer :

Le sisal, la jute, le coir (fibre de coco), bois, bambou et le palmier.

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leurs provenance. A savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface. Elles sont utilisées généralement dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et du béton. [9]

Tableau (I.5 (a)) présente les propriétés physiques des fibres végétales les plus utilisées, reproduit par Kriker [9].

Tableau I. 5(a)- caractéristiques physique de fibres végétales les plus utilisées

fibres	Diamètre en (mm)	Densité en (g/cm³)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
sisal	0.008-0.3	0.75-1.07	10.97-14.44	67-92	190-250
Noix de coco	0.11-0.53	0.67-1.00	11.44-15.85	22-28	85-135

Le tableau (I.5 (b)) présente les propriétés physique et mécanique de quelques fibres végétales reproduites par Kriker. [9].

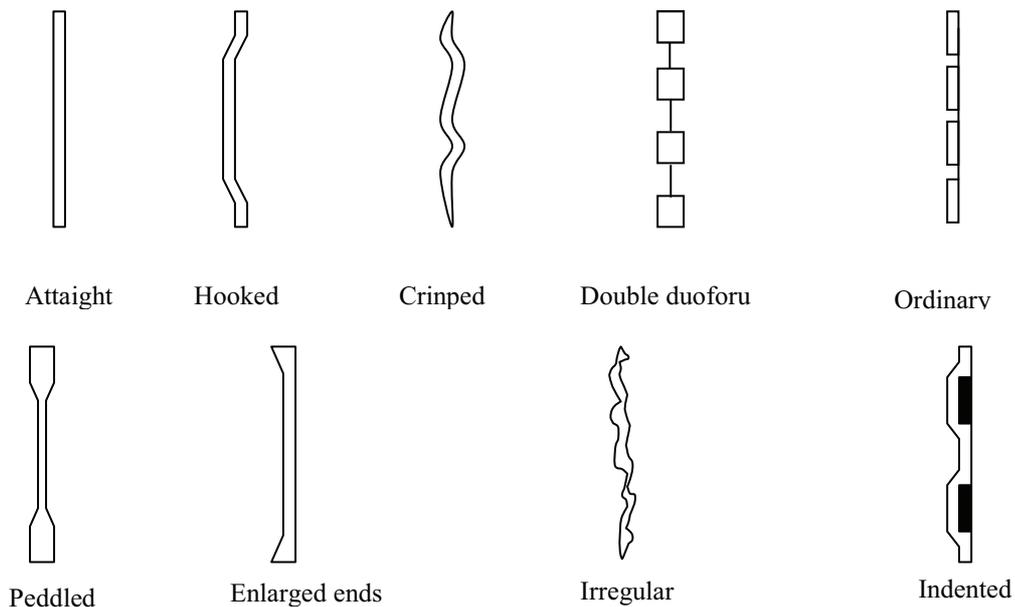
Tableau I. 5(b)- caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.

Fibres	Densité en g/cm ³	Allongement à la rupture	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-373	26.5
Lin	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Chanvre	-	1.6	690	-
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128

I.2.7. Les fibres métalliques :

La fibre métallique est parmi les fibres les plus commercialisées vendues, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (fig. I .4). Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 (GPa), une masse volumique de 7.85t/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. [10]

a) Forme de la fibre d'acier



b) Section transversale de la section d'acier

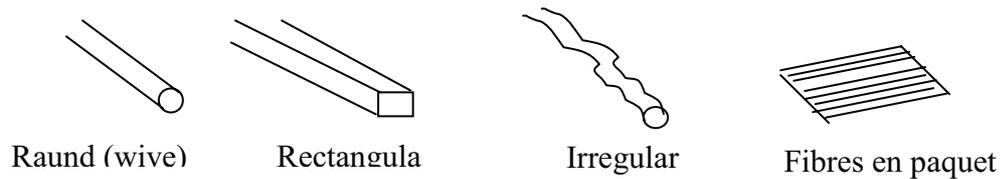


Fig. I. 1- Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables) [10]

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. [2]

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. [7]

La recherche de l'adhérence et d'une bonne compatibilité avec le béton à donné naissance à une grande variété de fibres métalliques susceptibles, par leurs formes ou leurs états de surfaces de mieux s'ancrer dans le béton.

A ce propos nous citons les fibres métalliques les plus utilisées.

I.2.7.1. Les fibres Fibraflex (fibres de fonte amorphe) :

Elles se présentent sous forme de rubans métalliques de 5 à 30 mm de longueur, de 1 à 1.6 mm de largeur et de quelques microns d'épaisseur. De part sa souplesse elles sont facilement incorporées dans le béton, que l'on peut ensuite couler, pomper ou projeter sans problème. Par 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).

I.2.7.2. 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) [11].

I.2.7.3. Les fibres Bekaert de chez Dramix :

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert; elles 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). Le crochet développe progressivement un ancrage puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci ainsi que par frottement à l'interface avec la matrice [12]. Les plus courtes sont utilisées essentiellement en béton projeté. Le tableau (I.6) donne les Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret.

Tableau I. 6- Caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Bekaret [12]

 fibre	Diamètre en (mm)	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Bekaret de chez Dramix	0.4 – 0.8	25 - 60	1100

I.2.7.4. 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). [11]

I.2.7.5. Les fibres Novatex :

Fibre d'acier destinée au renforcement tridimensionnel des bétons et des chapes. Elles se répartissent d'une manière excellente; soit une mise en œuvre très facile.

Elles sont constituées uniquement d'acier à haute ténacité, étiré à froid (norme ASTM A 820); leurs formes doivent être:

- facilement dispersées dans le béton avec les malaxeurs conventionnels;

- présenter une adhérence exceptionnelle dans le béton;
- ne modifie pas les caractéristiques rhéologiques du béton;
- s'oriente dans le sens de la taloche de façon à ne pas apparaître en surface du béton.

Le tableau (I.7), présente les caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex.

Tableaux I.7- caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre Novatex

fibre	Diamètre en (mm)	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Novatex	0.7	30	1150

I.2.7.6. 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 leur caractéristique importante est leur grande résistance à la corrosion [13]

Le tableau (I.8), illustre les caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte. A.

Tableau I. 8 caractéristiques physiques et mécaniques du ruban en fonte. A [13]

Fibre	Longueur en (mm)	Résistance à la traction en (MPa)
Ruban en fonte amorphe	15 – 30 – 45 - 60	200

I.2.8. Autres fibres :

Le besoin d'atteindre des performances techniques élevées fait que la recherche pour trouver et utiliser des fibres de nature et de formes variées ne cesse de ce développer.

En effet, un grand nombre de fibres peuvent être employées dans le renforcement des matériaux de construction, qu'elles soient animales, végétales ou minérales. [1]

Parmi cela nous pouvons citer les fibres céramiques qui ont connu beaucoup d'applications industrielles sous différentes formes. Elles ont trouvé un très grand succès surtout dans le domaine de la construction des fours et équipements auxiliaires [14].

I.3. Déchets industriels :

I.3.1. Introduction :

La préservation du patrimoine écologique représente un enjeu capital au niveau international. Dans ce contexte, maîtriser les risques croissant de pollution sur divers aspects (sols, nappes phréatiques,...), et leurs effets sur l'environnement, est devenu une nécessité.

Le stockage des résidus urbains et industriels en Algérie pose de plus en plus de difficultés, dans la mesure où il nécessite de grands espaces libres dans des zones périphériques, bien souvent indispensables au développement des infrastructures urbaines. Toutefois ces décharges présentent des risques de pollution des eaux souterraines et ne peuvent être installées n'importe où ni n'importe comment. La contamination des sols et des réserves d'eau par les décharges n'est pas un phénomène nouveau. Barre (1979) a cité un cas célèbre qui a été étudié pendant plusieurs années et concerne le dépôt d'ordure des riverside en Californie (USA). Cette étude a montré que la nappe située juste au dessous de la décharge était gravement polluée. [15]

Cependant, la valorisation des déchets industriels présente une solution à la fois écologique et économique pour parvenir à maîtriser les difficultés qui en découlent.

I.3.2. Classifications des déchets :

I.3.2.1. Définition :

Au sens de la loi, est considéré comme déchet :«tout résidu de processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus

généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon»[16].

On peut classer les déchets selon quatre grandes catégories représentant l'essentiel de la production et rendant compte de leur diversité : [16]

a)- Les déchets organiques :

Ces déchets sont composés de matière organique et son issus d'organismes vivants végétaux ou animaux.

b)- Les déchets inertes :

Ce sont des déchets composés d'éléments minéraux qui n'évoluent pas dans le temps (non putrescibles) et qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont les gravats, résidus d'activité extractive.

c)- Les déchets banals :

Ce sont des déchets qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont des déchets ménagers et les déchets qui leur sont assimilables et peuvent être traités de la même façon. Ce sont les emballages, les déchets de bois, de plastiques...

d)- Les déchets spéciaux :

Ces déchets contiennent des éléments nocifs en quantités variables impliquant des précautions particulières d'élimination. Ce sont les solvants, les produits phytosanitaires,...; certains déchets spéciaux doivent être stabilisés avant stockage. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon à respecter certains seuils pour différents paramètres (pH, siccité, fraction soluble...).

I.3.3. Généralité sur les pneus :

Un pneu de voiture ou d'engin est composé principalement d'un mélange de caoutchouc, de noir de carbone, d'aciers et de textile divers. Les pneus usés ne sont pas catégorisés comme déchets toxique ou dangereux, mais en cas d'incendie un dépôt

de pneus présente un danger pour la santé et l'environnement. Mis en décharge, les pneus provoquent une instabilité du sol de la décharge, se dégradant très lentement et créant des lieux propices à la nidification des moustiques et des rats. De plus, cela constitue un énorme gaspillage vu qu'un pneu a un pouvoir calorifique élevé. Une directive européenne interdit la mise en décharge de pneus entiers à partir de 2003 [17].

A cet effet, il est grandement intéressant de savoir qu'il est difficile et coûteux à la fois d'assurer une bonne gestion des déchets quelque soit sa nature et en particulier les pneus, tout en respectant l'environnement. Mais de part le monde la création des entreprises homologuées devient une nécessité incontournable pour collecter les pneus usés afin de les valoriser.

Jusqu'à la décade précédente, le développement et la protection de l'environnement étaient des tendances qui apparaissaient comme de grande contradiction idéologique c'est ainsi que dans les années quatre-vingts, un certain nombre de catastrophes comme les forêts mortes, les lacs atrophiés, les accidents des entreprises chimiques et la disparition de certaines espèces animales, ont fini par changer l'opinion publique mondiale. On commençait alors à reconnaître que les investissements en faveur de la protection de l'environnement, ne sont plus des pertes pour la communauté et peuvent constituer une contribution positive dans le développement économique (réalisation de profit en terme de bilan) et la protection sociale (lutte contre le chômage) [18].

Dans cette ordre d'idée de développement économique et de la promotion sociale, les statistiques faites au niveau de la wilaya de Ouargla qui présente une zone d'activité industrielle très importante, est en particulier le secteur d'hydrocarbure qui couvre la totalité du budget national, ayant un parc roulant qui est estimé à un chiffre global toutes catégories confondues de l'ordre de 60.000 pneus. Arrêté au 31/11/2003 par les services de mines de la wilaya, on peut conclure qu'elle présente une source intarissable. Qui demande une gestion rationnelle pour en tirer profit.

I.3.4. Définition et caractéristiques physiques des pneus :

I.3.4.1. Définition : [16]

Mieux comprendre comment est composé un pneu permet de mieux analyser les produits qui peuvent en être retirés après un recyclage.

L'enveloppe du pneu est décomposable en quatre éléments principaux :

a)- La carcasse :

Elle constitue le squelette du pneu, l'ossature du pneu est composée de couches de câble de différents types (nylon, acier, rayonne, polyester, aramide,...)

b)- Le talon :

Est l'élément rigide de la liaison entre la jante et le pneu. Il est composé d'une tringle de câble d'acier à haute adhérence.

c)- La bande de roulement :

Elle est composée d'un mélange de caoutchouc devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements, à l'abrasion...

d)- Le flanc :

Il est constitué de plusieurs types de caoutchoucs; son rôle est double : il doit, dans sa partie supérieure protéger la carcasse contre les échauffements et l'abrasion, et dans sa partie inférieure (plus épaisse) protéger la carcasse des contacts avec le rebord de la jante.

I.3.4.2. Caractéristiques physiques des pneus :

Sur le plan chimique, un pneu est un mélange à base de caoutchouc synthétique ou naturel, dans lequel sont ajoutées des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité, tels les plastifiants, les charges renforçant (noir de carbone), et les agents vulcanisant (dont le souffre).

D'autres composés chimiques sont ajoutés pour rendre plus performante la délicate opération de vulcanisation (accélérateur ultra accélérateur, activateurs, oxyde de zinc-odorants) [16].

Cependant, il faut savoir que la composition réelle des pneus est largement gardée secrète par les manufacturiers, rendant par là même, leurs recyclages plus difficiles.

Le tableau (I.9), donne la composition moyenne d'un pneu pour véhicule léger (VL) :

Tableau I. 9- composition moyenne d'un pneu VL en Europe [18]

Matériaux /éléments	Pourcentage massique
Caoutchoucs	48%
Noir de carbone	22%
Acier	15%
Textile	5%
Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
additif	8%

Le tableau (I.10), présente aussi d'autres caractéristiques des pneus telles que :

Tableau I. 10- caractéristiques physiques d'un pneu [18]

caractéristiques	Tourisme (VL)	Poids lourds (PL)
Poids moyen	7Kgs	50Kgs
Densité moyenne	0.2 entier	0.4 déchiqueté
Nombre de pneu /m ³	20	3
Présence de métal	15%	25%

Remarque :

Le pourcentage de la présence de métal est par rapport au poids total.

I.3.5. Les fonctions et la structure du pneumatique :

La structure radiale du pneumatique est constituée d'une carcasse textile très souple verticalement afin de permettre un contact optimal à pression uniforme du pneumatique sur le sol, et d'une ceinture métallique très raide longitudinalement et transversalement, qui permet d'engendrer des efforts longitudinaux et transversaux

aussi élevés que possible pour les fonctions de transmission et de guidage. La zone basse, constituée d'une tringle et d'un talon, permet d'assurer le montage de l'enveloppe sur la jante; l'étanchéité est assurée par une gomme intérieure très imperméable à l'air. [19]

I.3.6. Valorisation est domaine d'application des pneumatiques :

Les problèmes engendrés par la dispersion de déchets de pneus rendent difficiles leur collecte et leur valorisation. Ces déchets constituent alors une menace de nuisance pour notre environnement : dépôts sauvages, émission de fumées toxiques dues au brûlage; la mise en décharge constitue un gaspillage de matière et d'énergie.

Cependant les pneus usagés peuvent suivre différentes filières de valorisation : [18]

a) Le réemploi :

Rechapage, revente d'occasion, réutilisation en ensilage par les agriculteurs.

b) La valorisation énergétique :

Le caoutchouc a un pouvoir calorifique élevé. Les déchets de pneus peuvent donc servir de combustible de qualité dans les cimenteries et chaudières industrielles. [18]

c) La valorisation en matière :

Broyage en poudrette pour une utilisation en revêtement de sol. [18]

d) La valorisation en travaux publics :

Le broyage de pneus utilisés comme : remblais, confortement de digue et le recyclage sous forme de déchiquetés, granulats dans les applications du type enrobés, etc.

Utilisation de granulats en caoutchouc issus de broyage de pneus usagés, en substitution volumique des granulats naturels dans la confection du béton [20].

e) les fibres métalliques peuvent être utilisées comme renfort, c'est l'objectif de notre étude.

I.4. Conclusion :

Selon ce que on cherche, la nature des fibres utilisées est en relation avec les applications et les modes de mise en œuvre ; le choix des fibres dépend du rôle que l'on désire leur faire jouer.

Toutefois, pour un rôle structural de contrainte importante, l'utilisation d'une fibre de caractéristiques mécaniques élevées pour renforcer les matériaux de constructions est inévitable.

Après un siècle d'études, les chercheurs s'accordent à dire que les fibres doivent être :

- compatible avec la matrice.
- rugueuses, pour permettre une bonne adhérence.
- d'un prix abordable, compte tenu des dosages à employer.

Bétons de sable et bétons renforcés par fibres métalliques et leurs applications

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 [21].

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^{eme} siècle. Le procédé, breveté en 1901 par Hatschek sous le nom « d'amiante de ciment » a connu de nombreuses applications sous forme de plaques de tuyaux ou de conduits [22].

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 de fibre de grande longueur. Les fibres par leurs caractéristiques géométriques spécifiques (courts, minces, discontinues) ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton ou le mortier de façon uniforme [3]. Créant ainsi un réseau solidaire et plus efficace que les armatures traditionnelles vis-à-vis des fissures de faibles ouvertures. Ceci conduit à une durabilité plus grande des bétons ou des mortiers contenant des fibres

Les bétons de fibres qui font l'objet d'études sérieuses depuis plusieurs décennies, fait que l'objet visé par ses pionniers été de 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 fibre rend le coût des matériaux composites onéreux [23].

Le coût et le domaine d'application des matériaux composite dépend des types de fibres utilisées comme renforts.

II.2. Historique des bétons de sable :

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel. Selon POIEVIN [24], ce matériau trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

COIGNET qui est à l'origine de ce matériau construisit pour sa famille en 1851 à saint Denis (nord de Paris, France) une maison 60m de long et 7m de hauteur, du type R+2, avec mur de soutènement. Cet ouvrage fût entièrement édifié en béton aggloméré, des fondation jusqu'au toit [25].



POITEVIN [24] rapporte encore qu'entre 1869 et 1872 un aqueduc de 40km fut partiellement construit en béton aggloméré afin de relier Fontaine bleu à Orléans (France). Le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontaine bleu, d'une part de liant ($\frac{2}{3}$ chaux, $\frac{1}{3}$ ciments) et de 0.5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage en liant de 400kg/m^3 , plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers. Mis en service en 1869, le phare de Port-Saïd (Egypte) de 52m

Photo II 1. Phare de Port-Saïd [25]

de hauteur fut également construit en béton aggloméré composé de sable d'une plage avoisinante et de chaux importé de France photo (II .1).

COIGNET exporte sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise "New York and long island Coignet stone compagny" construit en 1871-72 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New York [24].

Vers la fin du IXX^{eme} et au début du XX^{eme} siècle, marquant la période de l'apparition du béton utilisant des granulats de gros calibres ainsi que l'utilisation de ciment à la place de la chaux qui a engendré une augmentation de résistance (allant jusqu'à 20MPa) furent facilement obtenus. A compter de là, le béton aggloméré ancêtre du béton de sable a cédé la place au béton connu jusqu'à nos jours [26].

La continuité dans le temps de ces ouvrages et qui sont en service jusqu'à nos jours est un témoignage des performances de ce matériau.

II.3. Utilisation du béton de sable dans le monde :

L'expérience de l'utilisation du béton de sable nous renseigne que ce dernier a été utilisé dans bien d'endroits de par le monde, dont on peut citer entre autre CEI (Communauté des Etats Indépendants) ex URSS, France, Nord Africain, Golf d'Arabie.

II.3.1. Béton de sable en CEI :

Les pays du CEI sont les premiers à redécouvrir le béton de sable. Ceci peut être expliqué par le fait que ces pays sont très pauvres en granulats et leurs ressources sont mal réparties. Dans certaines régions les granulats doivent être transportés sur plus de 1000km.

En 1918, une expérience très originale fut faite par NICOLATS DE ROCHEFORT [25], à Saint-Petersbourg. Elle consistait à broyer un mélange de sable et de clinker (à parts égales), puis à mélanger ce produit avec du sable dans le rapport de 1 (produit

broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celle d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 sable). Cette expérience fut reprise par le professeur académicien REHBINDER qui a pensé, en 1954, qu'en broyant ensemble le ciment et pour une partie de sable et en vibrant intensément lors du malaxage, on pouvait obtenir un béton de porosité minimale et d'homogénéité maximale. La photo (II .2) montre l'illustration de métro de Saint-Petersbourg. Voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.



Photo II 2. Métro de Saint-Petersbourg [25]

II.3.2. Béton de sable en France :

L' émergence de préoccupation nouvelles liées à l'exploitation des granulats et à leur utilisation rationnelle, en même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnement sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable, dans les années soixante dix, notamment dans le sud-ouest de la France [25].

Mais l'expérience n'est pas tout à fait la même avec celle adoptée en CEI (ex URSS). Il ne s'agit plus de broyer ensemble le ciment et une partie de sable et de vibrer

intensément lors du malaxage, pour obtenir un béton de porosité minimale, mais d'apporter une correction granulaire en sable par adjonction d'un filler [24].

Des résultats partiels intéressants et disparates ont conduit le CEBTP (Centre Expérimental de recherche Etudes du Bâtiment et Travaux Publics), à établir en 1986 un document de synthèse sur le béton de sable hyper-compacté et dans la même année l'association CEBTP et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ont établi un autre document sur la synthèse des connaissances sur les bétons de sable [26].

A partir de l'élaboration de ces deux documents, un vaste programme de recherche-développement sur l'utilisation optimale du sable pour les applications aux bétons de sable est lancé. Ce dernier confié à l'association SABLOCRATE.

Les travaux de recherche et de développement sur l'utilisation du béton de sable organisés dans le cadre du projet national (France) SABLOCRATE (projet lancé dans le cadre des opérations encouragées et cofinancées par le ministère de l'Équipement, géré par l'association pour la promotion et le développement des bétons de sable) ont débouché sur des applications diverses touchant à tous les domaines d'emploi du béton : construction routière, bâtiment, préfabrication, projection, reprises en sous œuvre, etc. une trentaine d'opérations pilotes ont ainsi été réalisées entre 1989 et 1993 [27].

II.3.3. Béton de sable en Golf d'Arabie :

L'utilisation du béton de sable dans le Golf d'Arabie est purement économique, vu la rareté des gros agrégats, qui ne sont disponibles qu'à des endroits très lointains.

Le béton de sable dans cette région a été employé pour la construction de fondations, de murs de soutènement et de dalles de planchers. Ce béton de sable, en fait, était un mortier, puisque le rapport en volume de S/C est de 3/1, et sa densité était d'environ 2.15. Il n'a pas été constaté des fissures plus importantes que pour un béton normal placé dans les mêmes conditions [28].

Aussi concernant le béton de sable utilisé dans le Golf d'Arabie, le phénomène de retrait n'est pas aussi important que celui d'un béton traditionnel [29].

II.3.4. Béton de sable en Afrique du Nord :

Le béton de sable a été utilisé pour la construction d'un brise lame en Egypte suite à une pénurie de gros granulats. La composition de ce béton a été retenue après une étude au laboratoire qui a permis de déterminer la relation entre la quantité de ciment en fonction du pourcentage d'agrégats fins par rapport à la totalité des agrégats [30]. A titre d'exemple des ouvrages réalisés nous rappelons le phare de Port-Said (1869)

II.4. Composition et formulation des bétons de sable :

II.4.1. Composition des bétons de sable :

Un béton de sable est composé essentiellement de granulats ayant un faible diamètre ($d \leq 5\text{mm}$), cependant une adjonction de gros granulats est possible à condition que le rapport massique G/S soit inférieur à 1. Dans ce cas on peut parler d'un 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 avec $2 < G/S < 2.8$ (béton normal) [2]. 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.

Mais, si on cherche à diminuer la valeur du diamètre au dessous de 16mm, 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 al [28] qui recommande un dosage en ciment égale à $K / \sqrt[5]{D}$. Le tableau (II.1) représente la relation entre la granularité et le dosage en ciment avec $K = 550$ et 700 (selon l'usage du béton).

Dans le cas des bétons de sable, l'étendue granulaire est bornée supérieurement à 5mm 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 [31]. 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 correspond aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels [25].

Tableau II.1. Relation entre la granularité et le dosage en ciment (K= 700) [28]

Granularité	$700 / \sqrt[5]{D}$ (dosage en ciment)
0/31.5	220
0/22.5	375
0/16	400
0/8	460
0/3	560

Dans ce qui suit nous allons donner les principales constituants du béton de sable

II 4.1.1. Ciments :

Le ciment 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) [32].

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.4.1.2. 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, d'un sable de carrière issu de concassage ou sable de dune. Seule leur propriété compte (l'utilisation d'un sable non propre n'est pas toléré) [25].

II.4.1.3. L'eau :

Tout comme les autres composants du mélange l'eau doit être propre, le dosage doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissure et une perte de résistance au moment de séchage, peu d'eau engendre une ouvrabilité faible, donc une diminution de résistance.

L'eau utilisée pour la confection du béton de sable doit être conforme à la norme NF P18-303. Comme le diamètre de granulats rentrant dans la constitution du béton de sable est inférieur ou égale à 5mm, cela conduit à une surface spécifique plus grande, donc à un dosage en eau élevé, l'addition d'adjuvants et autres ajouts devient inévitable pour réduire le rapport E/C afin d'améliorer la résistance.

II.4.1.4. Les adjuvants :

Comme pour les autres bétons, les bétons de sable utilisent les adjuvants sous diverses formes : plastifiants, super-plastifiants, etc. les adjuvants confèrent physiquement et économiquement aux bétons des avantages considérables entre autre l'amélioration de la maniabilité, l'utilisation du béton dans les conditions difficiles, ils permettent aussi l'utilisation d'autres types de matériaux dans le béton [33].

II.4.1.4.1. Rôle des fluidifiants dans le béton et leurs formes :

L'une des propriétés essentielles du béton frais est la maniabilité; cette dernière est principalement gouvernée par le dosage en eau. Connaissant les conséquences négatives de l'augmentation d'eau dans le béton qui sont :

- La ségrégation du matériau;
- La perte de d'homogénéité;
- L'augmentation de la porosité;
- La chute de la résistance;
- La diminution de la durabilité.

A cause de ces raisons qui se dressent comme obstacle pour l'obtention d'un béton de bonne ouvrabilité, les chercheurs ont depuis longtemps, déjà, font appel à des produits de la chimie organique, rendant ainsi le béton maniable sans diminuer sa compacité. Le tableau (II.2), présente la formation, la fabrication et la forme commerciale de quelques fluidifiants.

Tableau II.2-(formation – fabrication – forme commerciale) de quelques fluidifiants [34].

Formation	Fabrication	Forme commerciale
Mélatamine sulfonée formaldéhyde	Réaction résine de mélatamine / formaldéhyde + sulfonation par la solution de bisulfite de sodium + polymérisation	Solution aqueuse à 20% d'extrait sec couleur laiteuse
Naphtalène sulfonée formaldéhyde	Réaction naphtalène/formaldéhyde + sulfonation + neutralisation à la soude + polymérisation	Solution aqueuse entre 20 et 45% couleur brune
Lignosulfate de sodium (ou calcium)	Traitement de bois par voie chimique	Liquide de couleur brun foncé
Autres produits : saccharates, carboxylates, esters, acide sulfonique, etc.		

II.4.1.5. Les ajouts :**a) les fillers :**

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 [32]. Ce qui est favorable sur le plan technique par l'augmentation de la résistance à la traction et économique par la diminution des dosages en ciment

b) Les gravillons :

Possibilité d'utilisation de granulats 0/15 comme constituants dans le béton de sable à condition que le rapport massique G/S ne devrait pas dépasser 1 [32] dans le but d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques et rhéologiques (résistance, maniabilité, retrait, ...).

c) Les fibres :

Les fibres sont utilisées comme renfort au sein d'une matrice afin de contribuer

à l'amélioration de la résistance à la traction et pour diminuer le phénomène du retrait au jeune âge.

II.4.2. Formulation d'un béton de sable :

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner 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 formuler des bétons s'est étendue avec les adjuvants et les ajouts. Les méthodes de formulation traditionnelles présentent alors des limitations évidentes [34].

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 résistances 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 [31].

II 4.2.1. 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 ($D \leq 5\text{mm}$); 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 μm); 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 fonction 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 [32].

Dans ce qui suit nous allons présenter quelques exemples de compositions des bétons de sable de dunes; tableau (II.3):

Tableau II.3- Composition des bétons de sable de dunes pour 1m³

Référence	[36]	[26]	
Constituants de la matrice	Quantité en Kg/m ³		
	Composition 1	Composition 2	Composition 3
Ciment	330	460	400
Sable	1530	1350	1260
Fillers	/	/	200
Eau	260	300	240
C/S	1/4.6	1/3	1/3.65
E/C	0.79	0.65	0.6

II 5. Propriétés des bétons de sable :

II 5.1. Compacité :

La compacité d'un béton est définie comme le volume occupé par les éléments solides rapportés au volume total. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité [2].

Caquot a pu établir expérimentalement une relation mathématique pour un béton entre la porosité d'un empilement granulaire, celui-ci étant caractérisé par un diamètre d des éléments les plus fin et un diamètre D des éléments les plus gros (équation (2.1)).

$$P = P_0 (d / D)^{0.2} \dots\dots\dots(2.1)$$

- P₀** : constante expérimentale;
- d** : diamètre des éléments les plus fin;
- D**: diamètre des éléments les plus grands.

Notons que la validité de cette équation est limitée aux mélanges dont les proportions de chaque constituant dans l'étendue granulaire (E.G) sont également optimisées en terme de compacité. Autrement dit la compacité optimale ne dépend pas uniquement de l'étendue granulaire, mais également de la répartition granulométrique des grains [31].

Rappelons que pour les bétons de sable le diamètre de granulats ($D \leq 5\text{mm}$), de ce fait, il est évident que le mélange sable- ciment présentera une porosité très élevée en comparaison avec celle d'un béton ordinaire. Cette porosité est due a une augmentation de la surface spécifique, en effet, plus le module de finesse augmente plus la porosité diminue (Fig.II.1). Donc pour garder une compacité maximale la solution la plus facile est d'augmenter le dosage en ciment. Techniquement cette solution n'est pas souhaitable, vu le risque du retrait hydraulique, ainsi que l'élévation du coût global. Dans ces conditions, il est plus que nécessaire l'ajout d'un filler dont la granulométrie est voisine a celle d'un ciment, afin de combler une partie des vides de sable, dans le but de limiter le dosage en ciment.

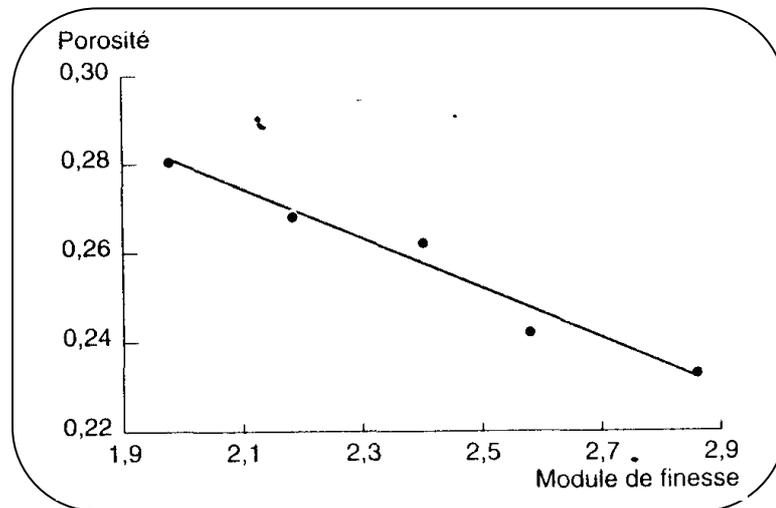


Fig II 1. Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables [31]

II 5.2. Maniabilité :

La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie

comme étant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini [33].

Les bétons de sable demandent une quantité d'eau élevée par rapport aux bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement entre 0.6 et 0.7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange.

Sachant que la granulométrie jouera aussi sur le besoin en eau : plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par la relation entre le module de finesse et la maniabilité (Fig. II.2) [25].

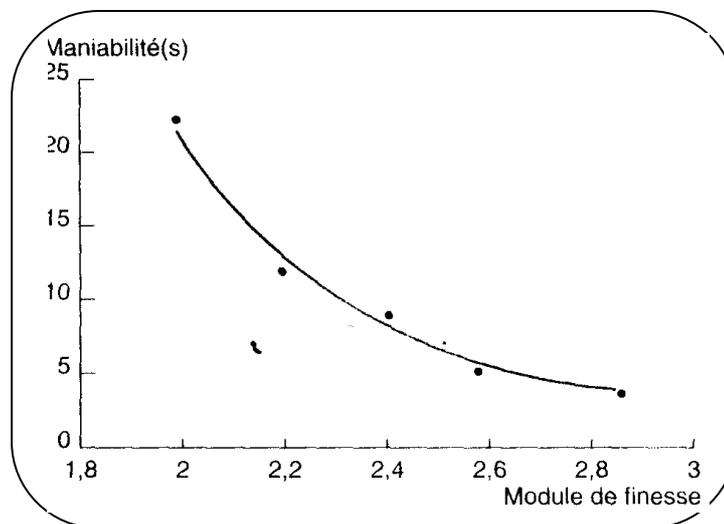


Fig II 2. Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables [31]

Donc il est clair, d'après la figure (II.2), que plus le module de finesse augmente plus le temps d'écoulement diminue ce qui implique une amélioration de la maniabilité.

II 5.3 Propriétés mécaniques :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques majeures pour un béton. De ce fait, il est indispensable pour n'importe quelles études de prendre en considération les résistances à la rupture en traction ou en compression.

II 5.3.1. Résistance à la traction :

Diverses études ont été réalisées concernant la résistance à la traction des bétons de sable, nous citons les travaux réalisés par CHAOUCH [26], sur quatre types de bétons

de sable de dunes dont leurs compositions ainsi que leurs résistances à la traction sont présentées dans le tableau (II.4) suivant :

Tableau II.4- dosages et résistances à la traction des bétons de sable de dunes [26]

constituants	Dosage en kg/m ³				Résistance à la traction en bars à 28jours			
	Composition				Composition			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Ciment	350	400	350	300	10.25	15.67	11.50	10.67
Sable de dunes	1505	1420	1470	1560				
Eau	245	280	280	240				
E/C	0.7	0.7	0.8	0.8				

D'après les résultats donnés dans le tableau (II.4), nous constatons que la résistance à la traction des bétons de sable de dunes est relativement inférieure à celle du béton normal.

II 5.3.1. Résistance à la compression :

Concernant la résistance à la compression des bétons de sable, et d'après les travaux de CHAOUCH [26], qui a été constaté que les valeurs de la résistance à la compression des quatre types de bétons de sable de dunes, cités précédemment, sont respectivement 140.61, 165.67, 149.41, 144.56 (bars). Ce qui nous permis de conclure, que ces derniers présente aussi une résistance à la compression relativement inférieure par rapport à celle d'un béton normal.

II 5.4. Le Retrait :

Des études expérimentales sur les retraits des bétons de sable en comparaison avec un béton classique, (Fig II.3) [35], montrent que le retrait total des bétons de sable peut atteindre le double de celui d'un béton classique. Cela dans les mêmes conditions de conservations (milieu non étanche).

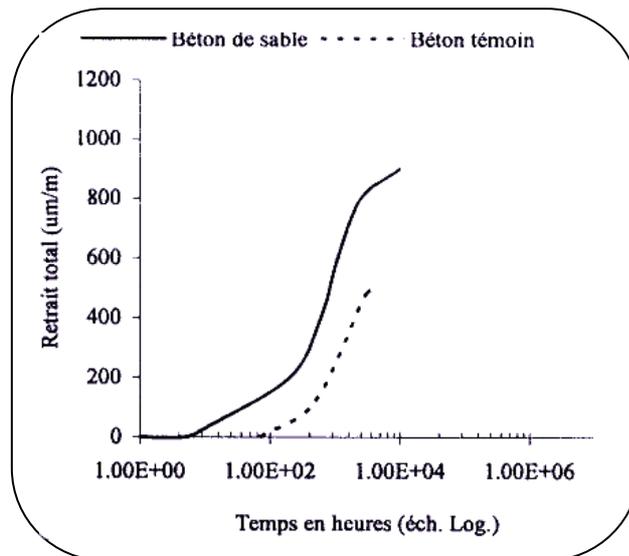


Fig II 3. Retrait total [35]

Cette constatation est renforcée par d'autres auteurs, entre autres celles de : BATATA. A et MEROUANI. Z [36]; après une étude expérimentale, ces derniers ont conclu que la valeur finale du retrait d'un béton de sable de dune de composition ($C=330 \text{ Kg/m}^3$; $S =1530 \text{ Kg/m}^3$; $E =260 \text{ l/m}^3$) est assez important, de l'ordre de 1.50mm/m , par rapport aux valeurs limites préconisé par le règlement pour un béton conventionnel à savoir 0.3 à 0.50mm/m .

AHMED CHAOUCH [26], a montré dans une étude des caractéristiques du béton de sable de dune de composition ($C=400\text{Kg/m}^3$; $S=1160 \text{ Kg/m}^3$; $F=300 \text{ Kg/m}^3$; $E=240 \text{ Kg/m}^3$), que le retrait de ce dernier dépasse $1500 \mu\text{m/m}$.

Enfin, la différence de retrait qui existe entre les deux matériaux (béton de sable et béton classique) est vraisemblablement liée à plusieurs paramètres, dont nous citons:

- l'influence du dosage en eau;
- l'influence du dosage en ciment;
- l'influence de la distribution et de la taille des vides, qui est largement influencée par la taille des grains de sable et la quantité des fines.

II 5.5. Le Fluage :

Concernant le fluage, la figure (II .4), montre que la valeur du fluage d'un béton de sable est plus important par rapport à celui d'un béton classique, ceci est liée vraisemblablement à la structure des matériaux c'est-à-dire aux paramètres rentrant dans la composition des deux matériaux, ces derniers influent d'une manière systématique sur les valeurs de déformations, par conséquent sur leurs résistances, que confirme par ailleurs les valeurs de module d'élasticité des bétons de sable plus faible par rapport a ceux des bétons classiques.

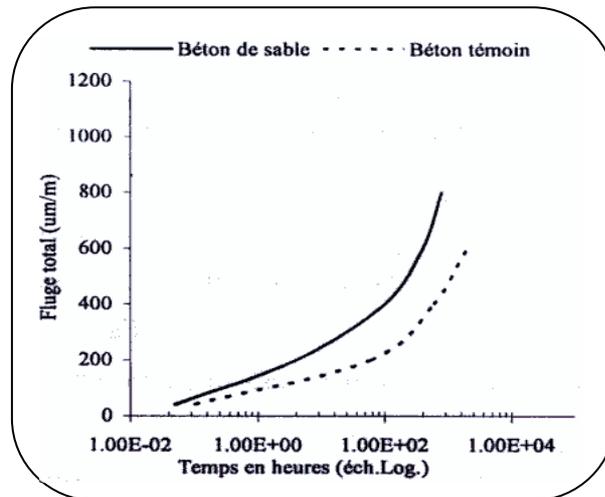


Fig II 4. Fluage total [35]

Dans le même ordre d'idée, AHMED CHAOUCH [26], a montré que le module d'élasticité du béton de sable de dune ($E = 2181.18$ MPa) est faible par rapport à celui d'un béton ordinaire (compris entre 25000 et 45000 MPa).

Enfin, d'après ce qui été dit précédemment, on montre que le fluage varie d'une façon inverse avec la résistance. En effet, un béton ayant une résistance élevée présentera un fluage faible, qui sera par ailleurs proche de celui d'un béton courant. Donc on peut diminuer le fluage du béton de sable en augmentant sa résistance comme le montre la figure (II .5) [25].

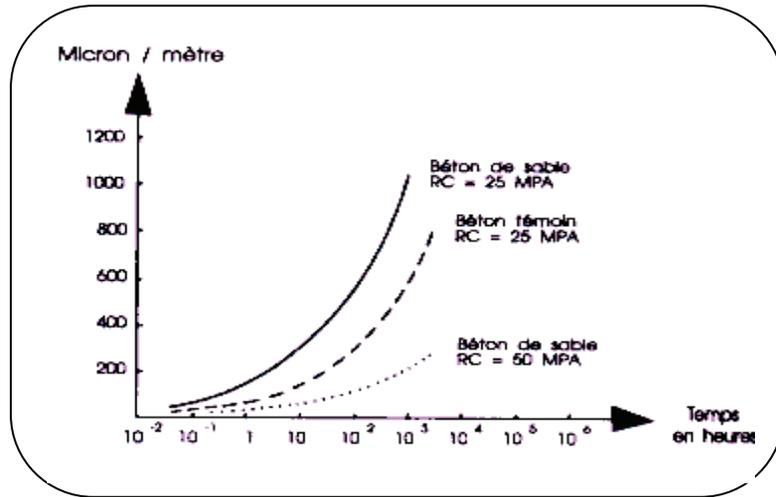


Fig II 5. Influence de la résistance sur le fluage total [25]

II 5.6. Durabilité:

La durabilité des bétons de sable comme pour les bétons courants, est souvent gouverné par la constitution physique de la matrice dont la porosité, la répartition géométrique des pores et la perméabilité. Outre ces paramètres il y'a aussi l'influence des phénomènes interne tels que: l'alcali-réaction, l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur.

Le béton de sable se distingue des bétons classiques par un fort dosage en sable; de ce fait il contient généralement plus de pores homométriques et de faible taille, donc un taux de vide élevé par rapport aux bétons classiques, (Fig II .6).

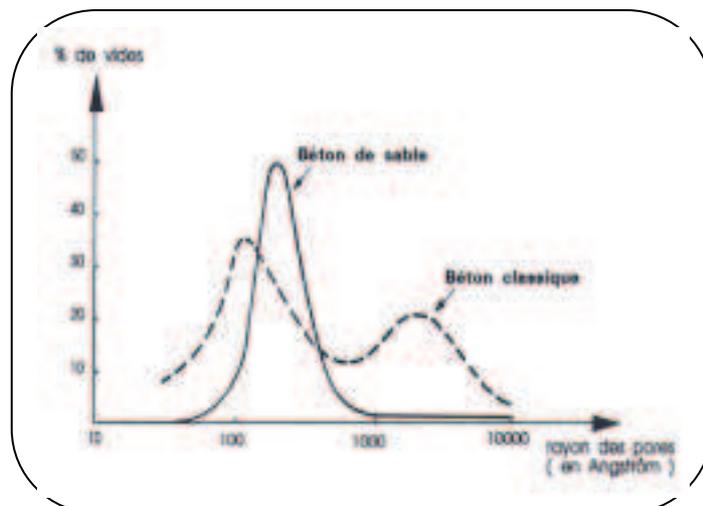


Fig II 6. Distribution de la porosité en fonction du rayon de pores [25]

Généralement l'environnement (milieu extérieur) influe sur la durabilité par deux paramètres essentiels:

IV.5.6.1. L'absorption capillaire :

L'absorption dépend essentiellement du taux et de la continuité des petits pores: un matériau qui présente un taux élevé de petits pores continus aura une absorption capillaire très élevée, et par conséquent une durabilité plus faible. Par contre s'il présente un taux élevé de petits pores discontinus, l'absorption capillaire sera moins élevée et la durabilité augmente, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté.

IV.5.6.2. La perméabilité :

La perméabilité varie en fonction de la taille des pores et de leurs continuités; de ce fait un matériau ayant un taux de pores élevés, de tailles grandes et continues présente une perméabilité forte, ce qui conduit à une durabilité faible. En suivant cette hypothèse un béton de sable aura une perméabilité moins élevée d'où une durabilité plus forte.

Cette distribution poreuse particulière, observé sur beaucoup de béton de sable optimisé dans le cadre du projet SABLOCRATE, contribue pour une bonne part à leurs bons comportements vis-à-vis des essais de durabilité [25].

D'autres part, la perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques [24].

II.6. Avantages et domaines d'application des bétons de sable :

Les bétons de sable font partie des nouveaux matériaux de construction, qui utilisent des ressources naturelles en sable, éliminant ainsi beaucoup d'obstacle qui se dressent comme entrave devant le développement et l'évolution de la construction. Nombreuses sont les qualités de ce dernier, qui le place parmi les matériaux privilégié de la construction, surtout dans certains domaines où les bétons classiques présentent des

anomalies dans leurs exécutions. Grâce aux propriétés spécifiques dont nous pouvons citer :

- Sa bonne qualité d'ouvrabilité, le béton de sable facilite le coulage des éléments fortement ferrailés, et dans les endroits dont l'accès est difficile;
- Sa composition granulaire de dimension faible, le béton de sable est surtout utilisé dans l'ornement et la finition des façades;
- Bonne homogénéité et cohésion due à sa granulométrie;
- Utilisation des ressources locales en abondance dans la nature. Ce qui revient à préserver l'environnement, ainsi qu'une réduction du coût de revient.

De ces nombreuses qualités le béton de sable comme matériau de construction est actuellement utilisé dans divers domaines d'application et avec divers procédés tels que :

a) Bâtiment :

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique.

b) Routes :

L'utilisation du béton de sable dans la construction routière est une technique qui a vu le jour en Aquitaine (sud ouest de la France) dans la première moitié des années 90, a été développé dans un souci de préservation des ressources et de l'environnement dans les régions riche en sable [21], présente aussi un intérêt économique majeur.

c) Béton non vibrés :

Les bétons de sable sont souvent des bétons fluides, utilisés notamment pour [23] :

- La fabrication de pieux forés;
- La réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

d) Projection :

La projection de béton de sable se fait d'une manière très pratique dans les travaux de réparation en génie civil et dans la stabilisation des talus.

II 7. Bétons renforcés par des fibres métalliques :

II 7.1. Historique des bétons de fibres métalliques [1] :

MIMOUNI [1] 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.

WEAKLY (Missouri, USA) déposa un brevet en 1912 pour l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec pour intermédiaire un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, l'allemand KLEINLOGEL proposa d'ajouter un volume relativement important de particules de fer ou de béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1927 en Californie, deux autres brevets ont été établis par MARTIN et MEISCHE-SMITH. Le procédé Martin recommande le malaxage de plaquettes d'acier embouties ou de fils d'acier avec le béton qui sert à la fabrication de tuyaux.

La figure (II.7) illustre les différents procédés sus-cités.

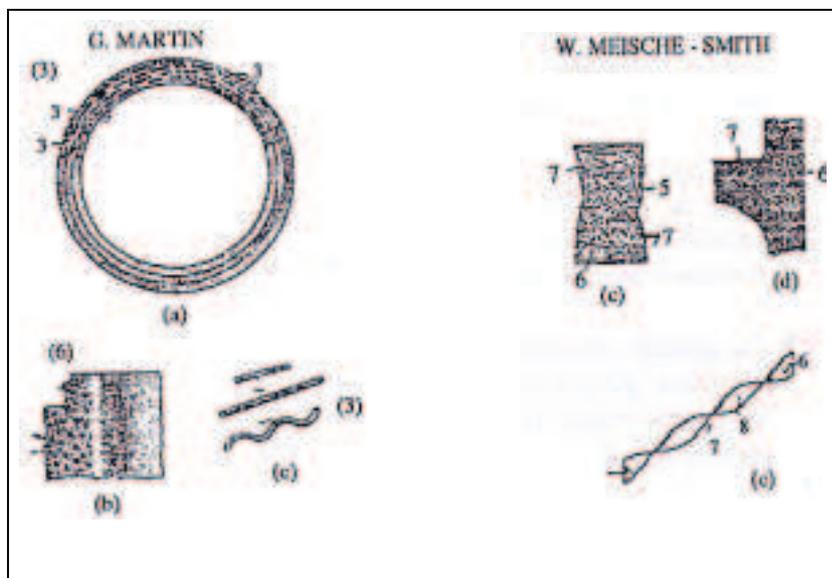


Fig II 7. Brevet établi sur les bétons de fibres par G. MARTIN et W. MEISCHE - SMITH

L'idée d'améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution est assez ancienne. ETHERIDGE (New Jersey)[1] proposa, en 1933, d'ajouter au béton des

fibres en forme d'anneau de différentes dimensions et de différents diamètres, pour améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue de béton utilisé dans la construction des voies ferrés. Fig. (II.8)

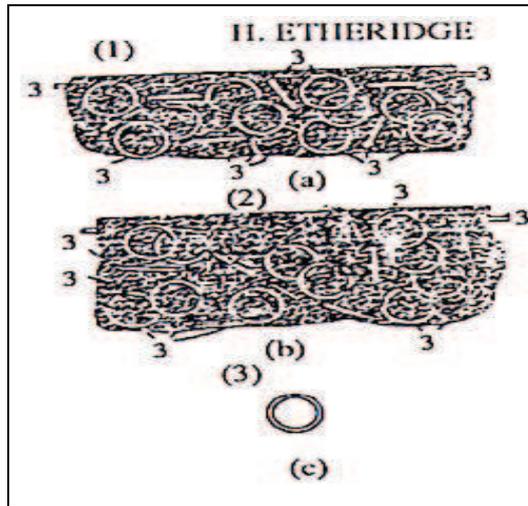
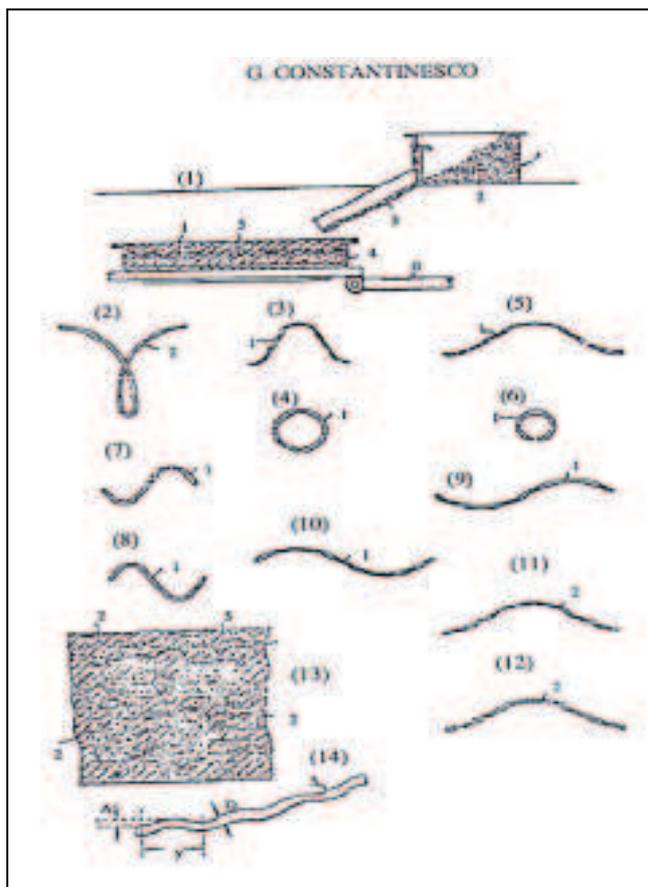


Fig. II 8. Brevet établi sur les bétons de fibres par H. ETHERIDGE

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 armé de fibres, fig (II.9). 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. [1]

Fig.II 9. Brevet établi par G. CONSTANTINESCO

II.8. Composition et formulation des bétons de fibres métalliques :

II.8.1. 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 [7].

Le tableau (II.5), présente quelques exemples de compositions de béton de fibres métalliques, avec une maniabilité normale.

Tableau II 5. Compositions des bétons de fibres métalliques pour 1m³

Référence	[23]		[37]	
Constituants de la matrice	Quantité en kg/m ³			
	Composition 1	Composition 2	Composition 3	Composition 4
Fibres	100	54	78	100
Ciment	400	360	425	430
Eau	176	200	191	170
Fumée de silice	/	/	/	43
Super plastifiant	5	16	4.25	10.6
Sable1	1012	1275	894	497
Sable2	/	/	/	497
Granulats	777	/	832	765
Filler	/	225	/	/
Microfiller	/	210	/	/
(G+F)/S	0.86	/	1.01	0.87
E/C	0.45	0.55	0.45	0.40

II.8.2. Formulation des bétons de fibres métalliques :

Formuler un béton de fibres métalliques 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 bétons de fibres métalliques (BFM) sont dans leurs majorité 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 [38].

Parmi ces méthodes empiriques utilisées nous citons :

SWAMY [39] a pu obtenir avec un dosage de 1% de fibres d'aciers un affaissement (slumps) de 10 à 13cm pour un béton ayant la composition suivante :

Tableau II 6. Composition d'un béton de fibres d'acier

Constituants de la matrice	Quantité en Kg
Ciment	0.70
Agrégat	2.25
Cendres volantes	0.30
Sable	1.80
Eau	0.40

MOENS [40] a limité le paramètre ($V_f \cdot l/d$) pour un coefficient qui prend d'avantage en compte l'aspect dimensionnel des granulats :

$$V_f \cdot l/d < C_m \dots\dots\dots(2.2)$$

Avec $C_m = \sum V_{ij} \cdot Cd_{ij} \dots\dots\dots(2.3)$

V_f : Pourcentage Volumique des fibres;

l/d : Elancement (longueur/diamètre);

V_{ij} : le volume d'une fraction de granulats de diamètre compris entre d_i et d_j .

Cd_{ij} : le coefficient d'interaction de la fraction d_{ij} de granulats tel que :

$$Cd_{ij} = 1.72 \cdot \ln(d_i d_j) \dots\dots\dots(2.4)$$

DEHOUSSE [41] a fixé le rapport $G/(G+S)$ à 0.50 afin de limiter la tendance aux micro bétons.

Une autre méthode expérimentale de formulation développée il y'a quelques dizaines d'années, il s'agit de la méthode de BARON-LESAGE; cette dernière à été largement

utilisée dans l'optimisation du squelette granulaire des bétons courants et adaptée aux bétons de fibres métalliques par PIERRE ROSSI. [23]

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 nécessité 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 :

- 1- Le rapport E/C et le pourcentage de fibres sont fixés au départ.
- 2- Variation du rapport S/G et la détermination de la maniabilité pour chaque valeur du rapport, qui permet de tracer la courbe (maniabilité-le rapport S/G), afin de déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est la plus grande (Fig. II.10).

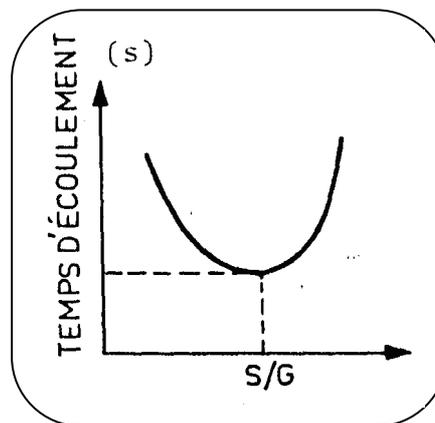


Fig II 10. Détermination du rapport S/G optimal [38]

- 3- sur la base de l'hypothèse n° 2, la quantité d'eau et de ciment sont ajusté (augmenter ou diminuer), mais le rapport E/C restant constant pour obtenir la maniabilité souhaitée, soit d'ajouter un super plastifiant pour régler la maniabilité.

II.9. Maniabilité des bétons de fibres :

La présence des fibres au sein d'une matrice jouent le rôle de granulats ayant une forme allongée; cette forme particulière peut engendrer des frottements parasite, créant ainsi une augmentation de la porosité du fait de la perturbation de l'ordre dans lequel les grains sont arrangés; ce bouleversement dans le squelette granulaire conduit à une diminution de la maniabilité et de la compacité, ce qui donne une faible ouvrabilité.

Parmi les paramètres qui influent sur l'ouvrabilité des bétons de fibres on peut citer :

- La géométrie de la fibre (élancement L/d et forme);
- Le dosage en fibres;
- La granulométrie du mélange.

II.9.1. Influence de la géométrie des fibres :

Toute la littérature s'accorde à dire que plus l'élancement l/d des fibres est grand, plus les fibres ont tendance à s'enchevêtrer, donnant ainsi naissance à la formation d'oursins, qui par conséquent rend difficile la mise en œuvre par l'effet de la diminution de l'ouvrabilité du mélange.

Pour des raisons de maniabilité, le rapport longueur/diamètre de la fibre doit être le plus petit possible. Au demeurant, plus la fibre est courte plus le pourcentage de fibres incorporable est élevée (à maniabilité fixée) [42]. De ce fait, on peut introduire dans le béton, un grand pourcentage de fibres courtes de faible diamètre et/ou un pourcentage faible de fibres longues de diamètre plus conséquent.

Dans le même contexte des études faites par SWAMY et MANGAT [39], qui ont montré que la formation d'oursins se ferait pour des élancements supérieurs à 100.

En outre la forme géométrique des fibres joue aussi un rôle important quant à l'ouvrabilité des bétons; selon que la fibre est cylindrique, aplatie, avec crochet ou sans, de diamètre (petit, grand) et de longueur (longue, petit). L'ouvrabilité est fonction de l'influence de chacun de ces paramètres.

II.9.2. Influence du dosage en fibres :

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

Dans le même ordre d'idée, des études ont été faites par EDINGTON [43]; pour ce dernier 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 incorporés dans les bétons, dont on peut citer la formule empirique établie par LIM et al [44] :

$$V_f < (B / (L/d) - 16) \times 1.08 (1 - (D_{max} / 32.5)) \dots\dots\dots (2.2)$$

V_f : pourcentage volumique des fibres;

L et d : 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 granulats en mm.

Dans le même cadre aussi, on trouve une règle qui est souvent utilisée comme une limite pratique pour les pourcentages de fibres incorporés dans les bétons [45].

$$((V_f \cdot L_f) / d_f) < 3 \dots\dots\dots (2.3)$$

V_f : pourcentage volumique des fibres;

L_f et d_f : sont respectivement la longueur et le diamètre des fibres.

II.9.3. Influence de la granulométrie du mélange :

La composition granulaire d'un mélange joue un rôle capital 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 :

SWAMY et MANAGAT [39], remarquent que pour une bonne maniabilité, le taux de fibres qui peut être incorporé est plus élevé pour un béton de sable ou mortier que pour un béton classique, ainsi le taux décroît avec la teneur en granulats.

ELIE [46], constate que les fibres s'arrangent d'une manière préférable avec les bétons ayant une granulométrie fins de l'ordre de ($L_f > 4D_{\max}$).

II.10. Fonctionnement et mécanisme de rupture des bétons de fibres :

II.10.1. Fonctionnement mécanique des fibres métalliques dans les bétons :

L'association des fibres métalliques avec les bétons ont pour rôle de reprendre les efforts au travers des macro -fissures, pour les bétons fibres métalliques nous pouvons utiliser des microfibras (dont la longueur est inférieure à 5mm)[47], afin d'améliorer la capacité portante et la ductilité des structures. Mais par contre elles ne permettent pas d'améliorer la résistance intrinsèque du matériau.

Il existe deux grandes familles de fibres métalliques, se distinguant par leur fonctionnement mécanique :[48]

- 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 fibres.

II.10.2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres :

On peut distinguer trois étapes dans le processus de fissuration d'une éprouvette en béton dont le volume est représentatif: [47]

- une première étape des microfissurations diffuse au sein de toute l'éprouvette.
- une deuxième étape au cours de laquelle les microfissures vont «coalescer» pour créer une ou plusieurs macro fissures : c'est la phase de localisation de la fissuration. Cette création de macro fissures constitue la fin de cette étape et le début de la suivante.
- une troisième étape qui correspond à la propagation d'un ou plusieurs macro-fissures conduisant à la ruine de l'éprouvette.

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 «coudre» 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 intrinsèques).
- Durant la phase de propagation de macro -fissure, les fibres métalliques peuvent également coudre 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 plus part 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 [23].

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. Ce fonctionnement est résumé sur la (FigII .11) [28].

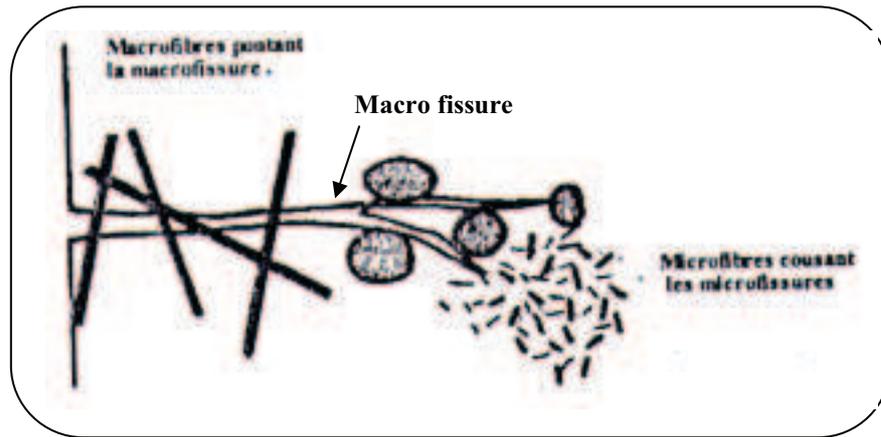


Fig II 11. Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration [28]

II.11. Propriétés mécaniques 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 nature 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.11.1. Comportement en compression du béton de fibres métalliques :

La résistance à la compression est, en général, une résistance caractéristique spécifiée, à laquelle doit répondre une résistance caractéristique garantie [7].

Concernant le comportement du béton de fibres métalliques en compression, plusieurs études ont été réalisées; il y'a celles qui révèlent que l'ajout des fibres au sein d'une matrice améliore la résistance à la compression d'autres, au contraire, ont constaté qu'il n'y a pas d'amélioration dont on peut citer :

Les chercheurs ROSSI, HARROUCHE, LE MAOU [49], ont conclu que la résistance à la compression du béton de fibres métalliques est inférieure à celle d'un béton non fibré.

ELIE ABSI [46], d'après une synthèse sur plusieurs études réalisées au CEBTP (Centre des Etudes de Bâtiment et Travaux Publics) en France; celle-ci montre qu'il y'a une partie de chercheurs qui rapportent, que le comportement du béton de fibres en compression diffère de celui du béton témoin en fonction du type et du volume de fibres ajoutées fig (II.12); cette figure montre que la résistance à la compression des BFM est inférieure à celle d'un témoin.

Ce dernier poursuit, qu'il existe d'autres chercheurs qui ont trouvé que l'influence de l'introduction des fibres métalliques dans le béton sur la résistance en compression (essai effectué sur des éprouvettes cylindriques Ø16xH32cm), dans ce cas la résistance en compression correspond à une contrainte maximale fictive déduite de l'effort maximal rapporté à la section initiale. Le tableau (II.7), présente la résistance à la compression d'un béton renforcé par des fibres métalliques à 28jours.

Tableau II.7- Résistance à la compression d'un béton renforcé de fibres métalliques [46]

Composition					Résistance à la compression à 28 jours en (MPa)
Ciment Kg/m ³	Rapport G/S	Eau l/m ³	Adjuvant (%ciment)	Fibres (%volumes)	
400	0.92	200	0%	0%	40.90
400	0.92	200	1%Fluid	0.3%E2	48.60 (+19%)
400	0.92	200	1%Fluid	0.3%EO	48.10 (+18%)
400	0.92	200	1%Fluid	0.5%EO	47.50 (+16%)

E2 : Fibre Eurosteel à deux têtes ; EO : Fibre Eurosteel ondulée.

D'après les résultats présentés dans le tableau (II .7), nous remarquons que la résistance à la compression du béton de fibres métalliques est supérieure à celle du béton non fibré (témoin).

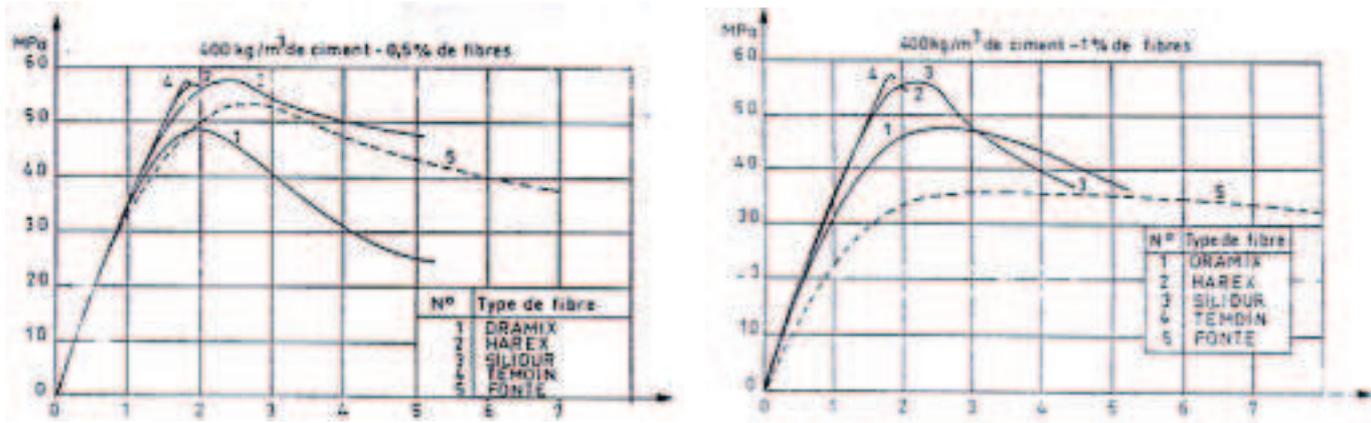


Fig II 12. Comportement des BFM à la compression en fonction du volume et du type de fibre [46]

Par ailleurs, des études comparatives concernant le béton classique et le béton de fibres métalliques, ont montré dans leurs majorités une légère augmentation de l'effort maximum de compression en fonction de l'augmentation de la teneur en fibre [39].

AIT-TAHAR [50], d'après une étude expérimentale, a conclu que la résistance à la compression est peu influencée par la présence des fibres, pour $V_f=1\%$, la résistance à la compression (R_c) augmente de 21.7% ; pour $V_f=2\%$, elle augmente de 39%, et pour $V_f = 3\%$, elle augmente de 52%, par rapport à celle du béton témoin. Or nous pensons, que pour une utilisation courante, cette amélioration est significative.

II.11.2. 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 béton 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).

II.11.3. 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 :

AIT-TAHAR [50], les résultats trouvés après une étude expérimentale permet à ce dernier de conclure que la résistance à la traction par flexion augmente avec le pourcentage des fibres incorporées dans la matrice du béton.

ELIE ABSI [46], d'après une synthèse sur des études réalisées au CEBTP, les résultats trouvés témoignent d'une amélioration très significative de la portance du matériau dans la phase plastique, après la première fissuration. Le tableau (II.8), présente la résistance en flexion du béton de fibres partiellement orientées dans le plan de la fissure.

Tableau II 8. Résistance en flexion du béton de fibres partiellement orientées [46]

Composition					Résistance en flexion à 28 jours en (MPa)
Ciment Kg/m ³	Rapport G/S	Eau l/m ³	Adjuvant (%ciment)	Fibres (%volumes)	
400	0.92	200	0%	0%	3.70
400	0.92	200	1%Fluid	0.3%E2	5.70 (+54%)
400	0.92	200	1%Fluid	0.3%EO	5.30 (+43%)
400	0.92	200	1%Fluid	0.5%EO	5.30 (+43%)

E2 : Fibre Eurosteel à deux têtes ; EO : Fibre Eurosteel ondulée.

D'après ces résultats, nous remarquons 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 du matériaux, la diminution de fragilité et l'amélioration de la ductilité du béton.

AIT-TAHAR [51], 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.11.4. 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.

Plusieurs études ont été réalisées dans ce sens, dont nous pouvons citer :

Les études faites par NAAMAN (1984), REINHARDT et AL (1986), RAZANI et AL (1988), BAILLY (1990), BAILLY et KHODRI (1991), MINDESS et YAN (1993) selon [23]; dans l'ensemble ces chercheurs ont montré qu'il y a une nette augmentation de l'énergie dissipée et de l'effort maximal atteint sur une éprouvette ou sur un élément de structure quand on utilise un béton fibré au lieu d'un béton non fibré.

ELIE ABSI [46], 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 montrés 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 [46].

MINDESS en 1993 et GAMBARDUA en 1994 selon [13], 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.11.5. 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 perpendiculaire à la charge, de ce fait, suivant l'orientation préférentielle des fibres par rapport aux fissures, nous distinguons : [23]

- Les fibres orientées perpendiculairement aux fissures, c'est la position idéale ou 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) [52] 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 du plus gros granulats, du pourcentage de fibres d'acier, de l'ouvrabilité du béton et de 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. C'est dans le sens de

l'extension positive maximale qu'il convient d'orienter les fibres.

- Dans le cas de fibres favorablement orientées par rapport à la charge, les résistances en compression peuvent être augmentés 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.

II.11.6. Retrait et fluage :

Le retrait et le fluage du béton ont principalement leurs origines dans la pâte de ciment. En général, ces propriétés sont prises en considération pour les bétons contenant de 350 à 400 kg de ciment par mètre cube. Sur ces bétons il est possible de réduire la valeur du fluage ou du retrait en diminuant la quantité de pâte de ciment, ce qui revient à augmenter la proportion des granulats (NEVILLE 1987) selon [7]. Mais de nos jours une nouvelle technique peut être appliquée; cela consiste à l'incorporation des fibres métalliques au sein de la matrice, ces derniers pouvant participer d'une manière positive dans la réduction du retrait et du fluage. [53, 54]

II.11.6.1. Le retrait :

L'étude du retrait des bétons consiste à analyser l'évolution des déformations de ces derniers au cours du temps lorsque il ne sont pas soumis à des forces extérieures (retrait libre); on distingue principalement les déformations d'origine thermiques et hydriques.

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. Dans ce qui suit nous allons présenter quelques expériences (essais) faites par des chercheurs, qui montrent l'influence positive des fibres sur le phénomène de retrait.

Pour MANAGAT et AZARI [53], une réduction du retrait de 35% à été obtenue avec 3% de fibres d'aciers de 22.50mm 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 :

$$\varepsilon_{bf} = \varepsilon_{bc} (1 - 2.45 \mu V_f l/d) \dots \dots \dots (2.5)$$

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 : Volume de fibres ;

l et d : Respectivement la longueur et le diamètre des fibres.

D'autre part, SWAMY [54], révèle 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%.

D'autres essais ont été réalisés, entre autres, nous citons des essais faites sur des bétons renforcés de fibres de fonte, qui montrent l'influence des fibres sur le retrait de dessiccation (retrait après durcissement), qui est inférieur à celui du béton sans fibres (témoin) de même composition (FigII 13,14).

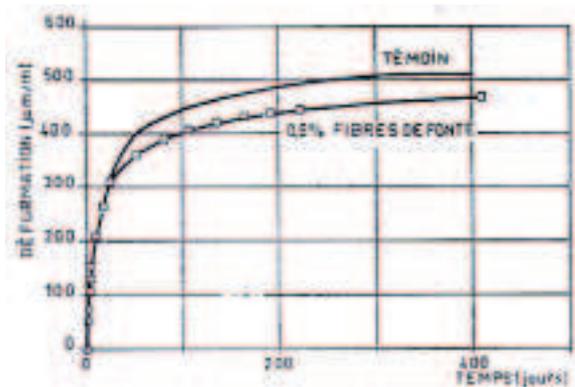


Fig II 13. Retrait de dessiccation après durcissement du béton sans et avec 0.5% de fibres de fonte[46]

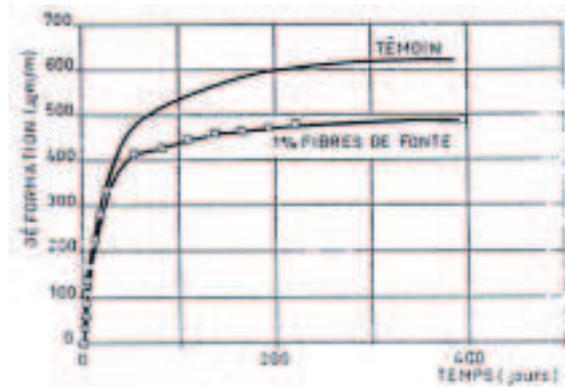


Fig II 14. Retrait de dessiccation après durcissement du béton sans et avec 1.0% de fibres de fonte [46]

D'après les figures (II 13,14), nous remarquons que plus le pourcentage de fibres augmente plus le retrait diminue par rapport au béton témoin.

II.11.6.2. Fluage :

L'étude du fluage consiste à analyser les déformations de ces derniers au cours du temps lorsque ils sont soumis à des efforts extérieurs permanente. Des essais effectués dans ce sens, montrent que les fibres métalliques n'influent pas d'une manière significative sur le fluage par rapport au béton courant (témoin). Parmi ces essais nous pouvons citer :

Les essais réalisés sur le béton renforcés par les fibres de fonte de dosages respectives 0.50% et 1%, figures (II 15,16), montrent que les déformations différées du matériau sous compression, reste semblable à celui d'un béton courant (témoin). Donc la présence des fibres n'influent pas d'une manière significative sur le fluage du béton.

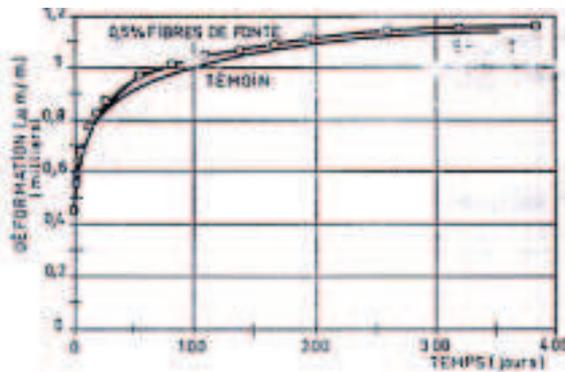


Fig II 15. Déformation différées sous compression du béton sans et avec 05% de fibres de fonte[46]

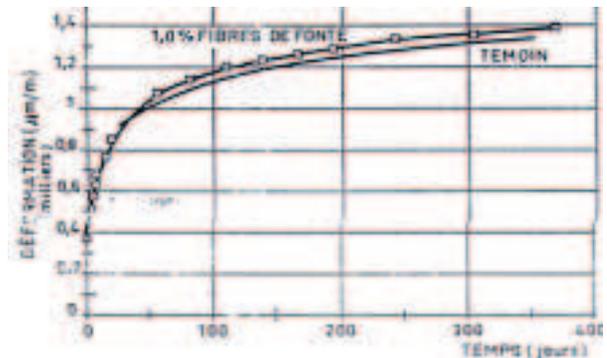


Fig II 16. Déformation différée sous compression du béton sans et avec 1.0% de fibres de fontes[46]

II.11.7. 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. Après des essais et des applications sur les bétons de fibres métalliques, nombreux ceux qui ont fait des remarques et des constations dont nous citons :

Une méthode expérimentale a été réalisée par DUBOIS et NOUGUIER, en 1989 qui conclut que, en dehors de quelques salissures possibles, nuisibles pour l'esthétique des structures, la corrosion de fibres non traversées de fissures n'induit aucun problème grave pour la durabilité ou la capacité portante de ces structures en BFM [23].

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 0.30mm, après 8ans de service malgré l'utilisation des sels de deverglaçage [13].

BAKKER en 1988 selon [23], l'observation faite par ce dernier sur les ouvrages en service et des expériences de laboratoire montre qu'il n'y a pas, statiquement, de relation directe entre l'ouverture de fissure et le degré de corrosion lorsque cette ouverture ne dépasse pas 0.3-0.4mm.

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.

II.11.8. Résistance au feu :

La nécessité d'avoir des structures en béton possédant un bon comportement vis-à-vis des hautes températures, et de plus en plus demandé de nos jours. Nous croyons que ceci est dû au nombre d'accidents survenant liés au feu, et qui entraînent souvent la ruine, causant ainsi sur le plan économique des pertes énormes.

Il faut signaler, que concernant la résistance au feu des bétons de fibres métalliques, très peu de travaux ont été réalisés sur ce sujet. Nous jugeons donc, qu'il n'est pas judicieux d'en tirer un enseignement concernant l'aspect positif ou négatif du rôle des fibres métalliques dans la résistance au feu d'une manière affirmative (définitive).

De là nous pouvons dire que le problème reste posé quant aux sections fissurées :

Donc 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. [13]

II.12. Conclusion :

L'utilisation des bétons de sable dans divers domaines d'emploi du béton, possède des arguments technico-économiques contribuant à favoriser son développement. Entre autres, la facilité de bétonnage qui conduit à une bonne exécution des ouvrages et leur bon façonnage, cela montre aussi l'aptitude du béton de sable à :

- assurer un bon remplissage de volume ;
- éviter la ségrégation et limiter le délavage ;
- assurer un bon enrobage des armatures.

Cependant, la majorité des auteurs s'accordent à dire que le béton de sable présente un retrait élevé et une résistance inférieure par rapport au béton ordinaire, du fait de sa granularité fine.

Dès lors, l'utilisation des fibres métalliques se présente comme un moyen efficace pour réduire les carences, en termes de retrait et de résistance des bétons.

La nécessité de produire des matériaux ayant des caractéristiques spécifiques a fait que, l'emploi de plusieurs variétés de fibres dans la construction soit possible. Leur utilisation comme renforts dans les matériaux, rend ces derniers plus ductiles et se rompt après un allongement plus important. De ce fait, l'incorporation des fibres dans les bétons améliore d'une manière positive leurs propriétés à la fois mécaniques et rhéologiques, du fait que ces fibres possèdent des caractéristiques mécaniques généralement élevées, ainsi qu'une adhérence appropriée, favorisant l'augmentation des résistances à la fissuration.

Caractérisation des constituants élémentaires et formulation du BSFM étudiés

III.1. Introduction :

Le béton et le béton de sable renforcé de fibres est un matériau composite, constitué d'une matrice (sable, grave, ciment, eau, adjuvant,...) et d'un renfort (fibres). Par manque d'une formulation universelle, ils sont l'objet actuellement d'études et de recherches de par le monde dans le but d'un développement industriel durable afin de s'imposer comme matériau composite à part entière et de trouver la place qui leur revient de droit dans le monde de l'industrie.

A cet effet nous avons tenté dans ce chapitre d'élaborer une formulation en se basant sur les dosages correspondant à un mortier normalisé, et en procédant par le choix et la caractérisation des constituants puis par leurs dosages.

III.2. Caractéristiques des constituants élémentaires :

Dans ce travail nous avons jugé d'utiliser des matériaux disponible en grande quantités dans la région de Ouargla (sable de dune, fibres métalliques issues de pneus usés, ciment CPJ-CEM II / A 32.5 de Ain-Touta, ciment CRS)). Ceci afin d'établir une formulation à moindre coût.

Avant de présenter la formulation nous allons présenter les résultats d'essais réalisés sur des matériaux utilisés dans la préparation du béton de sable fibrés.

III.2.1. Sable :

On entend par sable tout granulat 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 [25].

Dans cette étude et dans un cadre de valorisation nous avons tenté l'utilisation d'un sable de dune de couleur jaune provenant de la région de Sidi-khouiled à proximité de la ville de Ouargla,

III.2.1.1. Masse volumique absolue :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301; elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. [55]

a)- Mode opératoire :

Généralement deux méthodes sont utilisées pour déterminer la masse volumique absolue :

- **Méthode de l'éprouvette graduée.**
- **Méthode de la mesure au pycnomètre.**

Dans cette étude nous avons utilisée la méthode de l'éprouvette graduée, elle est simple, rapide et utilise le matériel courant du laboratoire.

Cette méthode consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau, ensuite peser un échantillon sec M_s de granulats (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 , la masse volumique absolue est alors donnée par la formule suivante : [55]

$$\rho_s = (M_s / V_2 - V_1) \dots\dots\dots(3.1)$$

ρ_s : Masse volumique absolue

M_s : Masse des grains solides

V_1 : Volume de l'eau

V_2 : Volume total (grains + solide)

$$\rho_s = 2500 \text{ kg / m}^3$$

III.2.1.2. Masse volumique apparente :

Cet essai est régi par la norme NFP18 – 301; elle est défini comme étant la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui ci intégrant à la fois les grains et les vides [2,56].

III.2.1.2.1. Mode opératoire :

Cette méthode consiste à remplir un récipient dont le volume V est bien connu , par un échantillon sec de granulats, en prenant soin de bien raser le bord du récipient, peser l'échantillon sec M de granulats, on détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$\rho_a = (M / V) \dots\dots\dots (3.2)$$

ρ_a : Masse volumique apparente ;

M : Masse totale de l'échantillon ;

V : Volume total de l'échantillon .

$$\rho_a = 1487 \text{ kg / m}^3$$

III.2.1.3. Coefficient d'absorption d'eau :

Il est défini par la norme NFP 18-555; cet essai sert à déterminer la porosité interne d'un granulat qui est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Il est donné par la formule suivante : [55]

$$A_b = ((M_a - M_s) / M_s) . 100 \dots\dots\dots (3.3)$$

A_b : coefficient d'absorption d'eau des grains (%);

M_s : masse des grains de sable à l'état sec après passage à l'étuve à 105°C ;

M_a : masse des grains après imbibition.

$$A_b = 0.066 \%$$

Nous remarquons que les grains de sable utilisés ont une capacité d'absorption très faible voir négligeable, alors on peut dire qu'elle est acceptable. [2]

III.2.1.4. Equivalent de sable :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-598; utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons ou des mortiers, en déterminant la proportion des impuretés argileuses contenu dans le sable. [55]

a)- Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériaux à étudier, il consiste à laver l'échantillon avec une solution lavante permettant de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation, selon un processus normalisé, puis en laisse reposer le tout, au bout de 20 minutes, ensuite on mesure les hauteurs h_1 , h_2 , (fig. III.1).

Enfin nous déduisons l'équivalent de sable qui, par convention est [55,56] :

$$E_s = (h_2 / h_1) \cdot 100 \dots\dots\dots(3.4)$$

E_s : Equivalent de sable (%);

h_1 : Hauteur de sable (propre + éléments argileux);

h_2 : Hauteur (sable propre seulement).

$$E_{sp} : 98 \% \text{ (équivalent de sable au piston)}$$

D'après le résultat obtenu il s'agit d'un sable très propre. Alors nous pouvons conclure qu'il y'a une absence 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.

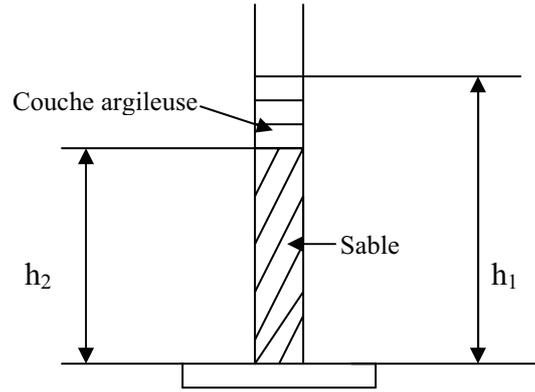


Fig. III 1. Dispositif de l'essai d'équivalent de sable.

Dans notre cas la hauteur h_1 est mesurée en utilisant un piston.

III.2.1.5. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer les pourcentages pondérés respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon [2, 55,56]. Cet essai est défini par la norme NFP 18-560.

Le tableau (II.1), présente le résultat moyen d'analyse granulométrique du sable de dune utilisé dans notre étude.

Tableau III .1- résultat moyen d'analyse granulométrique de sable de dunes

Ouvertures des tamis en (mm)	Module des tamis	Refus cumulés en (gr)	Refus cumulés en (%)	Tamisât cumulés en (%)
5	38	/	/	/
2.5	35	/	/	/
1.25	32	/	/	/
0.63	29	/	/	/
0.315	26	533.00	35.53	64.47
0.16	23	1456.00	97.06	2.94
0.08	20	1498.00	99.98	0.02
fond	/	1500.00	100.00	0.00

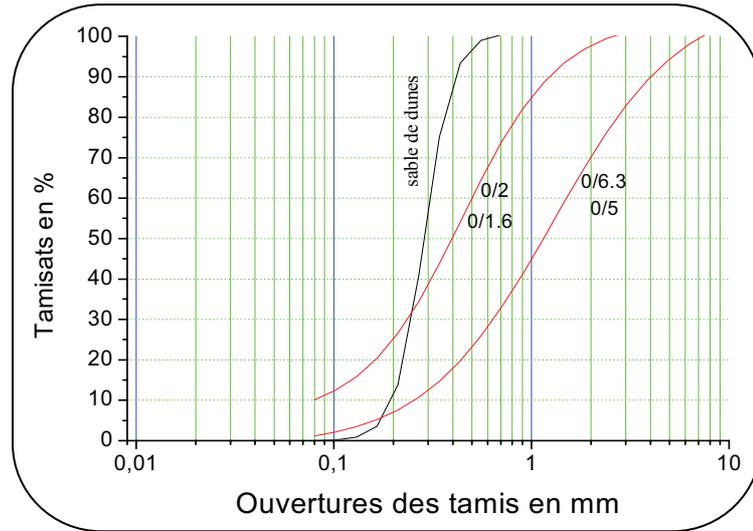


Fig III 2. Courbe granulométrique de sable de dunes

a)- Module de finesse :

La finesse d'un sable est estimée conventionnellement par une grandeur appelée module. Ce dernier est égale au (1/100) eme de la somme des refus. Exprimés en pourcentage des différents tamis de la série suivante : (0.16 - 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm).

Un bon sable à béton ou mortier doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8. Au dessous, le sable a une majorité d'éléments fins à très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. [2]

$$MF = \sum R_c / 100 \dots\dots\dots (3.5)$$

Rc : refus cumulé en (%) sous les tamis de module 23 à 38 ;

Dans ce cas :

D = 0.16 = 97.06 %

D = 0.315 = 35.53 %

D = 0.63 = 0 %

D = 1.25 = 0 %

D = 2.5 = 0 %

D = 5 = 0 %

$$\sum R_c = 132.59$$

$$M_f = \text{module de finesse} = (1 / 100).132.59 = 1.33$$

D'après la valeur du M_f il s'agit d'un sable très fin ayant une granulométrie très serrée $0 / 0.315$, avec absence d'éléments entre $0.315-5$ mm. Si nous comparons cette courbe granulométrique avec une courbe granulométrique de référence (fuseau) (fig. III.2), Nous constatons qu'une partie de la courbe granulométrique de notre sable de dune, est située en dehors du fuseau recommandé pour la confection des bétons classiques. De ce fait, une correction de cette courbe granulométrique en vue d'une utilisation de ce sable dans le béton est souhaitable.

III.2.2. Ciment :

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

Les résultats des essais de la masse volumique apparente et absolue du ciment utilisé sont donnés d'après la fiche de qualité [57].

- La masse volumique apparente : $\rho_a = 2120 \text{ Kg /m}^3$;
- La masse volumique absolue : $\rho_s = 3034 \text{ Kg /m}^3$.

III.2.2.1. 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) :

$$SSB = (K. \sqrt{e^3. \sqrt{t}}) / (\rho (1-e). \sqrt{\eta}) \dots\dots\dots[57] \dots\dots\dots (3.6)$$

t : temps de passage de l'air dans la couche de la poudre e 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** [57]

III.2.2.2. 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 [57] :

-Début de prise : **02h 08** ;

-Fin de prise : **03h 04** ;

D'après les caractéristique physique étudiées, nous constatons que :

Le poids spécifique est inférieur à la moyenne habituelle des ciments courants qui de l'ordre de **3.1 g /cm³**;

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

La prise du ciment satisfaisant à la spécification des ciments courants.

III.2.2.3. Caractéristiques chimiques :

L'analyse chimique du ciment utilisé d'après [57] a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau (III. 2).

Tableau III. 2- composition chimique du ciment en % massique

Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	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.

% Alcalis = Na₂O + 0.658 K₂O = 0.736 > 0.6%. Mais il n’y a pas risque de réaction alcalis – granulats car ces derniers ne sont pas des calcaires dolomitiques [55,56].

III.2.2.4.Composition minéralogique du clinker :

Le clinker est obtenu par la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire et d’argile, il est composé essentiellement par les quatre phases cristallines qui sont données dans le tableau ci- dessous [57,58].

Tableau III. 3- analyse minéralogique du clinker [57]

composé	Silicate	Silicate	Aluminate	Alumino-ferrie
	Tricalcique 3CaO, SiO ₂ (C ₃ S)	Bicalcique 2CaO ₂ ,SiO ₂ (C ₂ S)	Tricalcique 3CaO, Al ₂ O (C ₃ A)	Tétracalcique 3CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)
moyenne	55.05 ± 2.27	19.97 ± 1.85	9.44 ± 0.27	9.27 ± 0.24

D'après les valeurs présentées dans le tableau (III.3), le clinker à un pourcentage élevé de C₃S, de ce fait, il présente de forte résistance initiale [2].

III.2.2.5.Indice d’hydraulicité :

L’indice d’hydraulicité, ou indice de Vicat, est le rapport de la fonction acide du ciment à la fonction basique [3].

$$I = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2 \text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO}) \dots\dots\dots (3.7)$$

Pour le ciment utilisé I = 0.44 < 0.5 donc le ciment est neutre [2].

III.2.2.6. Caractéristiques mécaniques :

Les essais ont été réalisés au laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta. Le nombre d'éprouvettes était égale, chaque fois, au nombre de six. Les résultats moyens obtenus en compression (R_c) et en traction (R_t) sont [57] :

$$R_{c_{28}} = 48.24 \pm 2.89 \text{ Mpa} ; R_{c_7} = 37.61 \pm 2.77 \text{ Mpa} ; R_{c_2} = 22.57 \pm 2.24 \text{ Mpa} ;$$

$$R_{t_{28}} = 08.48 \pm 0.52 \text{ Mpa} ; R_{t_7} = 07.11 \pm 0.43 \text{ Mpa} ; R_{t_2} = 04.97 \pm 0.41 \text{ Mpa} .$$

III.2.3. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection du béton est celle du robinet de laboratoire de génie civil de l'université de ouargla.

Associé au ciment, 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 de 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	salinité
242	125	31	536	755	14.5	755	124	7.75	2799

*Les concentration sont données en mg / l

D'après les résultats exposés dans le tableau (III.4), il s'agit d'une eau qui représente une faible salinité [56], pouvant être utilisée pour les bétons et mortiers normaux.

III.2.4. Les adjuvants :

III.2.4.1. Généralité sur 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).

Les super plastifiants utilisés pour fluidifier les bétons ou diminuer leur rapport E/C ne sont finalement que des réducteurs d'eau beaucoup plus puissants que les réducteurs d'eau courants. Ce sont, en général, des produits à base de molécules de synthèses spécialement fabriquées pour les bétons. Leurs effets secondaires identiques à ceux des réducteurs d'eau courants, ne commencent à se manifester qu'à des dosages nettement plus élevés. En utilisant les super-plastifiants à des dosages plus élevés que les réducteurs d'eau courants, on peut, soit : [7]

- fluidifier les bétons sans voir apparaître des risques de ségrégation, d'entraînement d'air exagéré ou des retards de prise gênants.
- diminuer la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir un affaissement donné.
- diminuer à la fois la quantité d'eau de gâchage et le rapport E/C. Tout en obtenant un béton de grande fluidité.

Donc le réglage du dosage de la quantité de super-plastifiant permet d'obtenir un béton ou un mortier à maniabilité voulue.

III.2.4.2. Mise en œuvre des adjuvants :

Les adjuvants sont incorporés à très faible dose (inférieur à 5% de la masse du ciment) pendant le malaxage ou avant mise en œuvre du béton pour modifier les propriétés de plasticité –ouvrabilité, prise, durcissement et compacité [59]. Le tableau (III.5), illustre les différents adjuvants et leurs caractéristiques.

III.2.4.3. Caractéristiques de l'adjuvant utilisé :

L'adjuvant utilisé dans notre cas est un super-plastifiant Algérien, de type ' MEDAPLAST- SP'; c'est une solution liquide, se diluant facilement dans l'eau de gâchage. Le dosage utilisé est de 1.2% du poids du ciment. C'est le dosage recommandé par les fiches techniques du fabricant pour les bétons [60].

Il présente les caractéristiques suivantes :

Tableau III. 5- Caractéristiques Plastifiants-réducteur d'eau- superplastifiants [59]

adjuvants	plastifiants	Réducteurs d'eau- plastifiant	Super plastifiants
Ils ont pour fonction d'augmenter l'ouvrabilité sans diminuer les résistances mécaniques des bétons il agissent sur le béton frais avant la prise.	Ils déflocculent les de ciment est diminuent le frottement interne. La pâte est lubrifiée la plasticité s'améliore, la mise en œuvre est facilitée.	Ils permettent de réduire la teneur en eau est d'obtenir en conséquence une meilleur résistance mécanique du béton sans nuire à l'ouvrabilité.	Ils augmentent considérablement l'ouvrabilité pour les ouvrages avec ferrailage dense afin d'assurer l'enrobage des armatures et la capacité du béton.
dosages	Généralement < 0.5%	Généralement < 0.5%	Généralement 0.5% à 3%
Introduction	Dans l'eau de gâchage	Dans l'eau de gâchage	Dans le béton avant sa mise en oeuvre
Effets sur la mise en œuvre du béton	A rapport eau/ciment constant amélioration de la maniabilité	A maniabilité constante, réduction d'eau > 6.5%	A rapport eau/ciment constant grande fluidification du béton gain d'affaissement d'au moins 8 cm.
Résistance à toutes échéance	Maintien des résistances du témoin ou légère augmentation du fait du meilleur mise en place	Supérieur à celles du témoin augmentation minimum 10%	Par rapport au témoin, légère diminution possible ($\geq 90\%$ des résistances du témoin).

Suite du Tableau III. 5- Plastifiants-réducteur d'eau- superplastifiants [59]

adjuvants	plastifiants	Réducteurs d'eau- plastifiant	Super plastifiants
Effets secondaires favorables	Possibilité d'accélération du durcissement	augmentation de capacité, diminution de la perméabilité. possibilité d'améliorer la résistance du béton aux agents chimiques agressifs	L'emploi de ces adjuvants peut permettre de réaliser un béton à hautes performances utilisant de faible rapport eau/ciment
Autres effets		Possibilité d'une légère augmentation du retrait	

- **Forme** : liquide ;
- **Couleur** : marron ;
- **Densité** : 1.18 ;
- **pH** : 7-8 ;
- **Teneur en chlore** : < 1g / l.

Les propriétés de l'adjuvant sont :

- Amélioration de la maniabilité à rapport E / C constant ;
- Conservation de l'ouvrabilité par temps chaud.

III.2.5. Les fibres :

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de nature métalliques issues de l'incinération des pneus usés, photo (III.1 -(a)) (annexe). Le choix de la fibre a été fait dans le but d'une valorisation d'un déchet industriel.

III.2.5.1. Caractéristiques des fibres métalliques issues de l'incinération des pneus usés :

Nous avons effectués des essais qui nous en permet de caractériser les fibres métalliques issues de l'incinération des pneus usés comme suit :

a)- Incinération des pneus et extraction des fibres :

Au premier lieu nous avons procédé au collecte des pneus usés, est cela au près de la zone industrielle de Hassi Messaoud. Après, vient la deuxième étape concernant l'opération de l'incinération des pneus afin d'extraire les fils métalliques constituant l'armature des pneus, photo (III .2), (annexe). Une fois l'opération terminée on attend jusqu'a ce que la température baisse, à ce moment en passe à l'opération la plus importante qui consiste à récupérer les fils métalliques, on les fasse assembler sous forme de faisceaux pour enfin, les coupés selon les longueurs voulues.

b)- Caractéristiques mécaniques de la fibre utilisée :

1. Masse volumique absolue :

Cet essai est réalisé sur dix (10) échantillons, nous avons trouvé une masse volumique $\rho_a=7890 \text{ Kg / m}^3$. Cette valeur se rapproche de près de la masse volumique absolue d'un acier normal ($\rho_a =7850 \text{ Kg / m}^3$). Cela nous permet de constater que l'incinération n'a pas trop influée sur la masse volumique.

2. Charge de rupture à la traction :

Les essais de ruptures des fibres ont été réalisés à l'aide d'une machine appelé FRANK Machine d'essai de traction 85649, photo (III .3, 4), (annexe); 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 dispositif 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 2.5mm/min.

La première phase consiste à mesurer le diamètre exacte ainsi que les longueurs des fils, dans ce cas nous avons choisi des fils de diamètres ($D_1 = 0.9\text{mm}$, $D_2 = 0.28\text{mm}$) et

avec des longueurs $L_1 = 100\text{mm}$, $L_2 = 140\text{mm}$ et $L_3 = 180\text{mm}$. Le tableau (III.1) en annexe présente les forces moyennes en (N) et les allongements en (mm) des fils de diamètre $D_1 = 0.9\text{mm}$.

Les figures (III. 3, 4), présentent les résultats des essais.

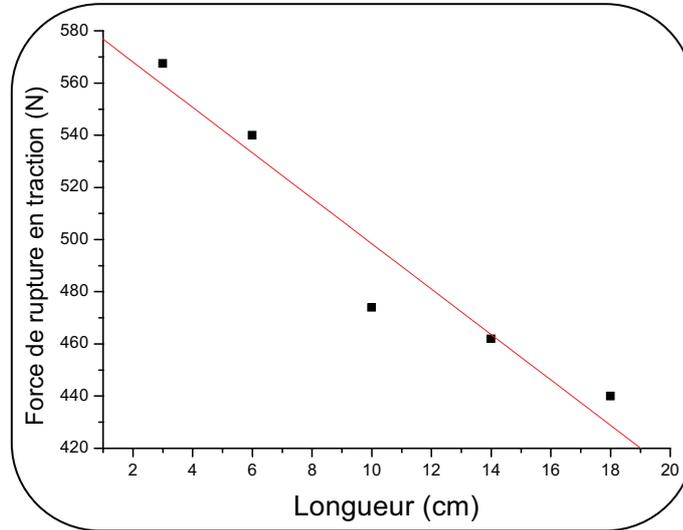


Fig.III.3- Force de rupture en traction pour FM de $D_1 = 0.9\text{mm}$ en fonction de la longueur

A partir des valeurs des forces à la rupture en traction correspondant respectivement à $L_1 = 100\text{mm}$, $L_2 = 140\text{mm}$ et $L_3 = 180\text{mm}$, (fig. III.3), nous avons déduit les valeurs des forces à la rupture F_{R1} et F_{R2} en (N) correspondant respectivement à $L_f = 30$ et 60mm .

- $F_{R1} = 567,50 \text{ N}$;
- $F_{R2} = 540,00 \text{ N}$.

Ensuite, à partir des valeurs des allongements, nous déduisons les valeurs des déformations, et à partir des forces moyennes nous obtenons les contraintes moyennes, ainsi nous pouvons tracer la courbe (contrainte-déformation), permettant de déduire la valeur du module de déformation suivant la formule :

$$\text{tg}\alpha = E = (\sigma / \varepsilon) \dots \dots \dots (3.8)$$

E : Module de déformation ;

σ : Résistance de traction ;

ε : Déformation.

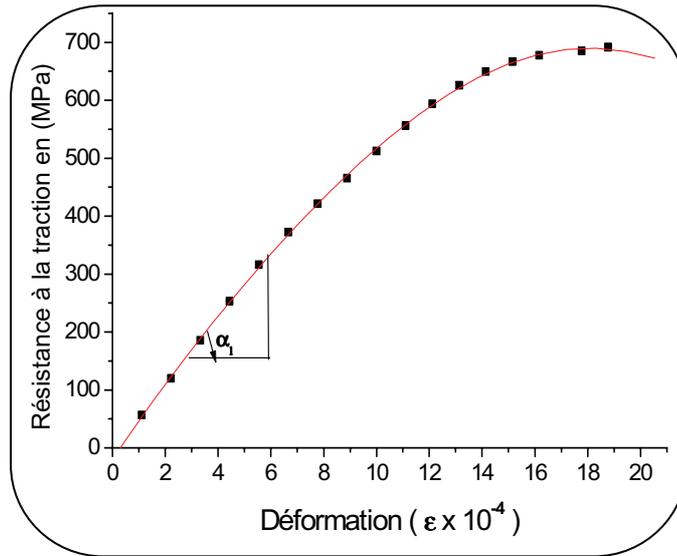


Fig III.4- Courbe (contrainte-déformation) en traction pour FM de $D_1=0.9\text{mm}$

A partir de la (fig. III.4), nous avons déterminé le module de déformation de la fibre de diamètre $D_1 = 0.90 \text{ mm}$, le tableau (III .6) donne les caractéristiques physiques et mécaniques de la fibre utilisée.

Tableau III. 6- caractéristiques physiques et mécaniques des fibres
 $D_1 = 0.90 \text{ mm}$

Diamètre en (mm)	0.90
Longueur en (mm)	30 – 60
Rt de rupture en (MPa)	892.05 -848.83
Module de déformation linéaire en (GPa)	550.00

Le tableau n°02 (annexe) présente les forces moyennes en (N) et les allongements en (mm) des fils de diamètre $D_2 = 0.28\text{mm}$, (annexe). Et les figures (III 5,6) présentent les résultats des essais.

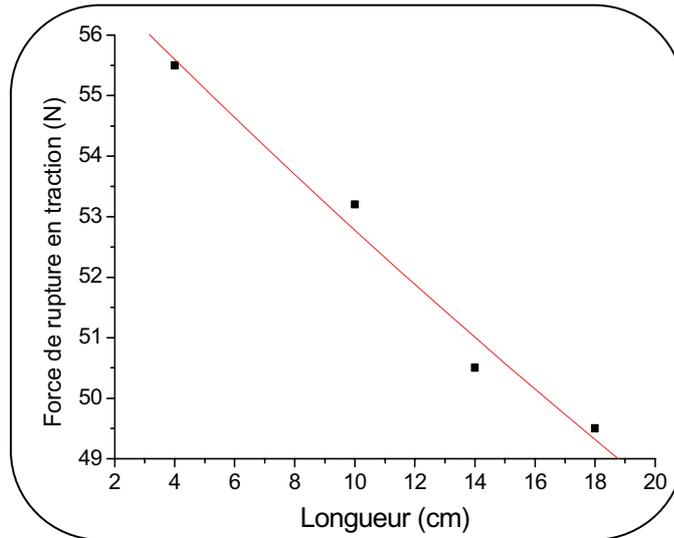


Fig III.5- Force de rupture en traction pour FM de $D_2=0.28\text{mm}$ en fonction de la longueur

A partir de la (fig. III.5), nous avons déduit la valeur de la force F (N) correspondant à $L_f = 40 \text{ mm}$;

- $F_{R3} = 55.50 \text{ N}$.

De la même manière que précédemment, nous déterminons les valeurs de déformations et des contraintes moyennes pour déduire la valeur du module de déformation.

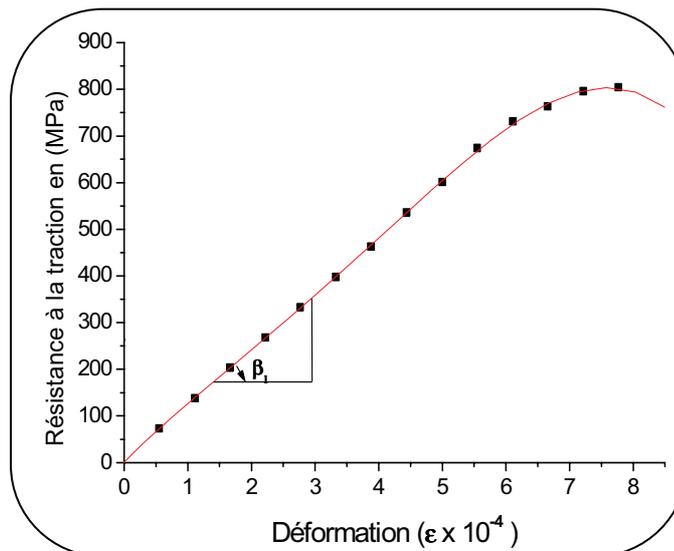


Fig III.6- Courbe (contrainte-déformation) en traction pour FM de $D_2 = 0.28\text{mm}$

A partir de la (fig. III.6), nous avons déterminé le module de déformation de la fibre de diamètre $D_2 = 0.28\text{mm}$, le tableau (III.7) présente les caractéristiques mécaniques et physiques de la fibre utilisée.

Tableau III.7–Caractéristiques mécaniques et physiques de la fibre($D_{\text{moy}}=0.28\text{mm}$)

Diamètre en (mm)	0.28
Longueur en (mm)	40
Contrainte de rupture en (MPa)	901,33
Module de déformation linéaire en (GPa)	1158.80

D'après les résultats présentés dans les tableaux (III 6,7), nous constatons que la fibre utilisée possède une bonne résistance, toutefois si nous la comparons avec celles citées dans la littérature, sa résistance est légèrement inférieure à celles des fibres (Dramix, Novatex). Mais en revanche la fibre utilisée et notamment celle de $D = 0.28\text{mm}$ présente un excellent module d'élasticité.

Cette différence de résistance entre les fibres de diamètre $D_1 = 0.9\text{mm}$ et $D_2 = 0.28\text{mm}$ est peut être attribuer à la différence de composition entre les deux aciers.

III.3. Formulation des bétons de sable renforcés de fibres :

Une fois le choix définitif des constituants rentrant dans la composition des bétons de fibres fixée, on procède à la détermination de leurs dosages et cela dans le but d'avoir une maniabilité et une résistance mécanique souhaitées.

Comme la formulation de ces matériaux à base de fibre ne peut pas, et ne doit pas se résumer à l'introduction directe d'un pourcentage de fibres, dans un béton ayant été préalablement optimisé sans fibres [23], des essais sur la maniabilité des bétons de fibres ont été réalisés dans le but d'optimiser la formulation des bétons de fibres.

Dans ce qui suit nous allons formuler un béton de sable témoin et un béton de sable renforcé de fibres.

III.3.1. Formulation d'un béton de sable témoin :

Pour la composition du béton de sable témoin, nous avons utilisé un dosage en ciment et sable correspondant à celui trouvé après une optimisation par CHAOUACH [26], qui est la même que celui d'un mortier normalisé; c'est à dire une part de ciment et trois parts 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 de VÉBÉ, pour la détermination de la quantité d'eau qui correspond à un mortier "plastique".

III.3.1.1. Les essais de maniabilité :

a)- 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 [2], afin de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour la composition de ce dernier.

Les essais de maniabilité du béton de sable ont été réalisés conformément à la norme [P18-448] par l'essai Flow test.

• Conduite de l'essai :

L'essai Flow test en lui-même consiste à démouler sur une table à secousses un moule (tronc de cône) de béton de dimensions ($D_{inf} = 25\text{cm}$ (grande base), $D_{sup} = 17\text{cm}$ (petite base), $h = 15\text{cm}$ (hauteur)).

Après avoir été rempli de béton en deux couches égales damées chacune à 10 coups au moyen d'une tige en bois de section carrée de 4cm de côté, on soulève le moule verticalement en prenant le soin de ne pas imprimer au béton des mouvements latéraux. Ensuite on lui applique une série de 15 secousses verticales (élévation suivie d'une chute de 12mm) en 15 secondes; enfin on mesure le diamètre total D après étalement, Fig. (III – 7) [2].

L'étalement (ζ) est donné par la formule suivante :

$$\zeta = 100 \cdot ((D - D_1) / D_1) \cdot \% \dots \dots \dots (3.8)$$

ζ : Etalement en % ;

D : Diamètre total après étalement ;

D_1 : Diamètre de la grande base, cône (D_{inf}).

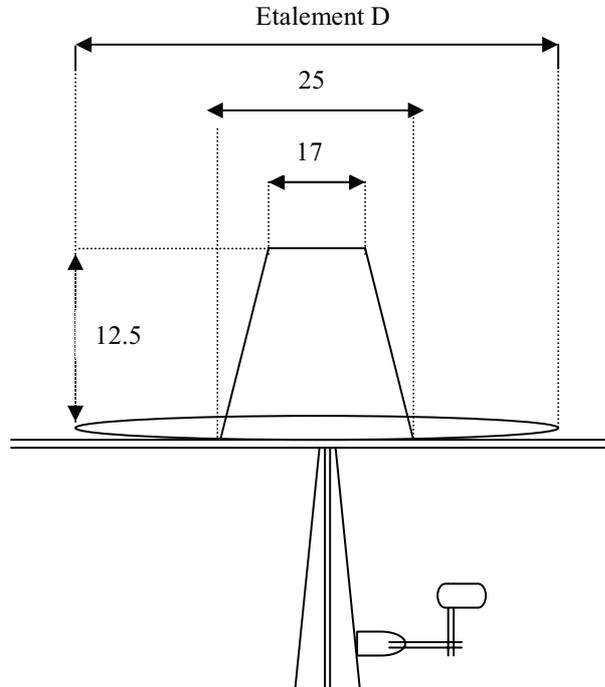


Fig.(III .7) Table à secousses (Flow test) [21]

Le tableau (III .8), présente les résultats de l'étalement moyen en (%) et en (cm) avec le rapport E/C variant entre 0.50 ÷ 0.60. La moyenne de l'étalement est calculée sur la base de trois mesures.

Tableau III. 8- Etalement en (%) et en (cm) du béton de sable de dunes

E / C (eau/ciment)	0.50	0.55	0.60
Sable en (Kg)	6.6	6.6	6.6
Ciment en (Kg)	2.2	2.2	2.2
Eau en (litre)	1.1	1.21	1.32
Etalement moyen en (cm)	44.43±0.01	38.91±0.02	37.60±0.01
Etalement moyen en (%)	77.73±0.02	55.66±0.07	50.04±0.04

Pour le rapport $E/C = (0.50, 0.55)$ le résultat trouvé ne correspond pas vraiment au résultat souhaité parce que la pâte du béton de sable après les secousses a subi un effritement (discontinuité dans la pâte). Pour cela nous avons retenu celle du rapport ($E/C = 0.60$). En effet dans ce cas le béton forme une galette approximativement circulaire et sans ségrégation, ayant un étalement moyen égal à **37.60cm**, qui correspond à un béton de classe F_2 selon la norme ENV 206 [55].

- F_2 : étalement en (cm), qui varie entre **35 à 41cm**.
- L'étalement en % trouvé est égale à **50.04%**; qui correspond à un béton plastique [2].
 - étalement en % pour un béton plastique varie entre **50 à 70%** [2].

b)- L'essai VÉBÉ :

Cet essai est défini par la norme [ISO 4110]; 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 (fig. III.8) [55].

• Conduite de l'essai :

L'essai Vébé consiste à placer dans un récipient cylindrique en métal non attaqué par la pâte de ciment, d'un diamètre interne de 240 mm et de hauteur de 200 mm, solidement fixé sur la table vibrante, photo (III .5,6), voir annexe, un moule ayant la forme d'un tronc de cône aux dimensions intérieures ($D_{inf} = 200$ mm; $D_{sup} = 100$ mm ; $h = 300$ mm).

Le moule est rempli de béton de sable en trois couches, après compactage, au tiers de la hauteur du moule. On pique chaque couche 25 fois avec la tige de piquage, en répartissant les coups uniformément sur la section de chaque couche. Concernant la deuxième et la couche supérieure le piquage se fera sur toute leurs épaisseur, de sorte que la tige pénètre légèrement dans la couche sous adjacente. Une fois le béton démoulé, l'essai se poursuit par la mise en vibration de la table jusqu'à ce que la face supérieure du béton soit entièrement aplaniée [55]. A ce moment on arrête la vibration, le temps compté sera celui de l'écoulement du béton.

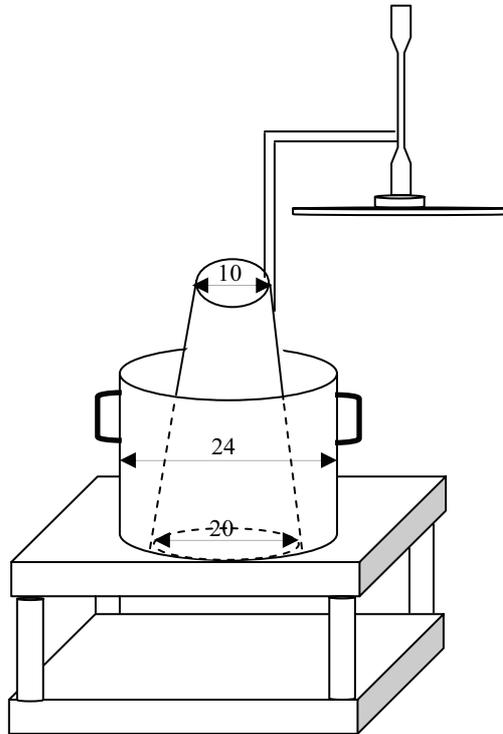


Fig. (III .8) Essai Vébé

Pour un $E/C = 0.60$, l'essai Vébé a donné un temps moyen $T_{\text{moy}} = 20 \pm 2$ en secondes. Cette valeur est calculée sur la base de trois mesures.

- Le temps à l'essai Vébé $t = 20 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ correspond à la classe V2 (béton plastique) selon la norme ENV 206 [55].

De ce fait, la composition retenue pour le béton de sable classique est :

- une part (01) de ciment;
- trois (03) de sable;
- $E/C = 0.60$.

III.3.2. Formulation d'un béton de sable renforcé de fibres :

Concernant la formulation du béton de sable renforcé de fibres métalliques, nous avons gardé le rapport E/C fixe dans la composition de la matrice du béton de sable classique, qui est égal à 0.60. La quantité des fibres incorporées en volume varie de 0.5% à 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'ensemble des chercheurs de par le monde s'accorde que l'introduction d'une certaine quantité de pourcentage 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 de fibres métalliques (BSFM).

Pour la formulation de béton de sable à base de fibres métalliques, nous nous sommes basé sur l'essai de maniabilité. Et comme la plus part des chercheurs utilisent l'essai de maniabilité dynamique, nous avons opté pour l'essai Vébé.

Pour pouvoir travailler avec une quantité d'eau fixe égale à celle d'un béton témoin, nous avons utilisé un super plastifiant. La quantité de ce dernier est obtenue par l'essai Vébé, de sorte à travailler avec une ouvrabilité constante à un temps d'écoulement $T = 20 \pm 2$ (S). Les résultats de l'essai Vébé sont donnés par la figure (III.9).

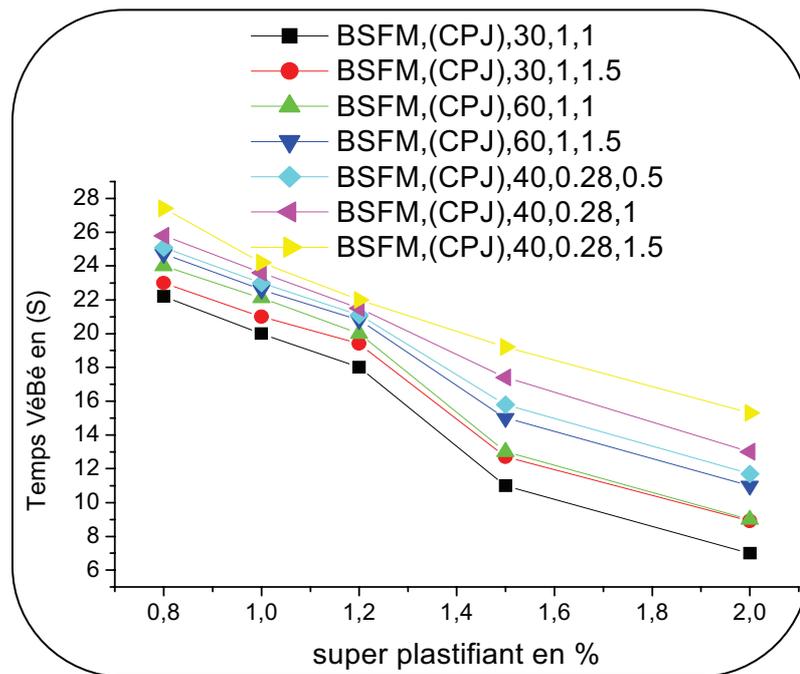


Fig III. 9. Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage de super plastifiant

D'après les résultats trouvés nous avons opté pour un pourcentage de super plastifiant de 1.2%.

Tableau III. 9-Composition du béton de sable renforcé de fibres métalliques (1m³)

% de fibres en (volume)	Sable en (Kg)	Ciment en (Kg)	Eau en (l)	Fibres en (Kg)	Super plastifiant en (Kg)
Sans fibres	1389.13	463.04	277.83	/	/
0.5%	1376.63	463.04	277.83	39.25	5.55
1.0%	1364.13	463.04	277.83	78.5	5.55
1.5%	1351.63	463.04	277.83	117.75	5.55

Enfin des essais, des masses volumiques apparentes ont été déterminées, les résultats de ces essais sont donnés comme suit :

- $\rho = 2130.00 \text{ Kg / m}^3$ pour un béton témoin (sans fibres);
- $\rho_1 = 2156.75 \text{ Kg / m}^3$ pour un dosage en fibres de **0.50%**;
- $\rho_2 = 2183.50 \text{ Kg / m}^3$ pour un dosage en fibres de **1.00%**;
- $\rho_3 = 2210.25 \text{ Kg / m}^3$ pour un dosage en fibres de **1.50%**.

D'après ces résultats, nous constatons que la masse volumique augmente en fonction de l'augmentation des pourcentages de fibres introduit dans la composition du béton de sable, cela est dû au fait, que la masse volumique des fibres métalliques est largement supérieure à celle du sable.

III.4. Conclusion :

L'étude des caractéristiques des constituants de ce matériau, a montré que le sable pourrait donner des résistances importantes du fait de sa propreté (très pauvres en éléments argileux). En revanche il présente une granularité homométrique serrée, pourrait influencer sur l'augmentation du retrait. Pour les fibres métalliques issues de pneus usés, les essais réalisés sur ces derniers montrent qu'elles présentent des caractéristiques mécaniques élevées.

La composition des bétons de sable de dunes renforcés par ces fibres métalliques est différente de celle d'un béton courant. Lorsqu'on augmentait le taux de fibres, le

composite se malaxait, se vibrait et se mettait en place de moins en moins bien. Cela nous conduit à dire que la maniabilité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de fibres incorporées, d'où la nécessité d'utiliser un super plastifiant pour assurer une meilleure ouvrabilité. Sans autant toucher à la résistance par l'augmentation du dosage en eau. Ce qui nous a permis par, la suite, de déterminer la formulation la plus adéquate d'un béton de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques tout en gardant le rapport E/C fixe.

Comportements Mécaniques et Rhéologiques du Béton de Sable renforcés de Fibres Métalliques étudié

IV.1. Introduction :

Parmi les caractéristiques importantes du béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques, nous avons choisi de déterminer les résistances à la compression et à la traction à 28, 90 et 180 jours, et aussi d'étudier le phénomène de variation dimensionnelle (retrait, gonflement) à 3, 7, 14, 14, 28 jours.

L'utilisation dans le domaine de Génie Civil des bétons de sable s'élargissent de plus en plus, sachant que la plupart des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable ordinaire sont moins performantes que celles des bétons classiques; le renforcement des bétons de sable peut améliorer ces performances mécaniques et rhéologiques. De ce fait, l'introduction des fibres métalliques dans le béton de sable s'inscrit, alors, dans ce contexte. Afin d'évaluer la contribution réelle des fibres métalliques issues des pneus usés sur les performances mécaniques et rhéologiques des BSFM. Une série d'essai expérimentale est lancée, dans ce qui suit nous allons exposer les différents résultats obtenus.

IV.2. Modalités d'essai de résistance mécanique :

Généralement les bétons sont classés selon leurs résistances à 28 jours. Cette dernière est souvent influencé 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 de traction par flexion et la contrainte de rupture à la compression du béton de sable ou de mortier.

IV.2.1. Essai de rupture par flexion :

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1. Un dispositif à rouleau utilisé en flexion (3points), Fig (IV.1), comportant deux appuis à rouleau distant de 100 ou 106.7mm sur lesquels repose l'éprouvette prismatique 40x40x160mm, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée F_f [61].

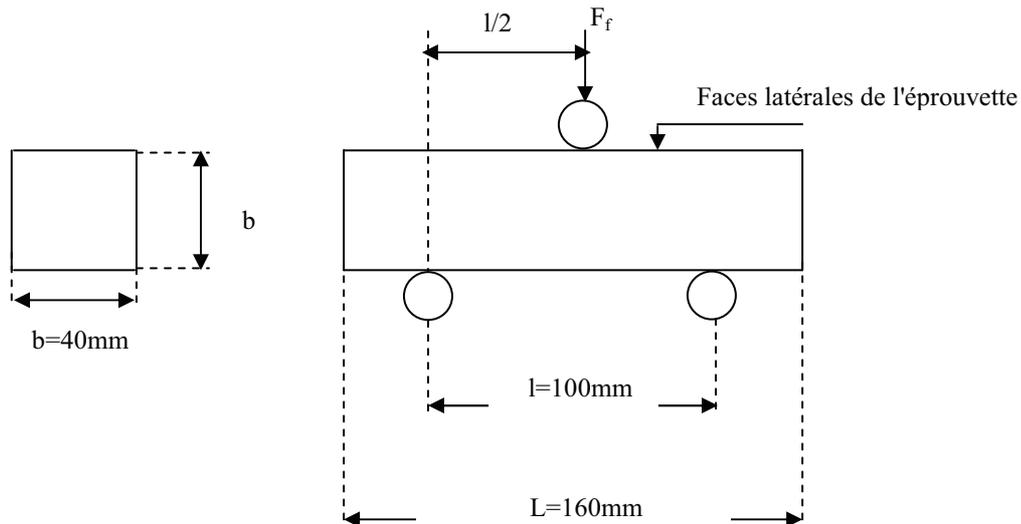


Fig IV.1. Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points) [55]

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation (4.1) suivante :

$$R_f = (1.50 \cdot F_f \cdot l) / b^3 \dots\dots\dots(4.1)$$

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 en (mm);

b : Côte de l'éprouvette est égal à 40mm;

L : Longueur totale de l'éprouvette.

IV.2.2. Essai de rupture par compression :

Cet essai est régi suivant la norme EN 196-1, exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi éprouvettes provenant de l'essai précédent. Chaque demi prisme est essayé en compression sur ces faces latérales de moulage sous une section de

40x40mm, entre deux plaques de métal dur. Le demi prisme est placé entre elle de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm Fig (IV .2) [61].

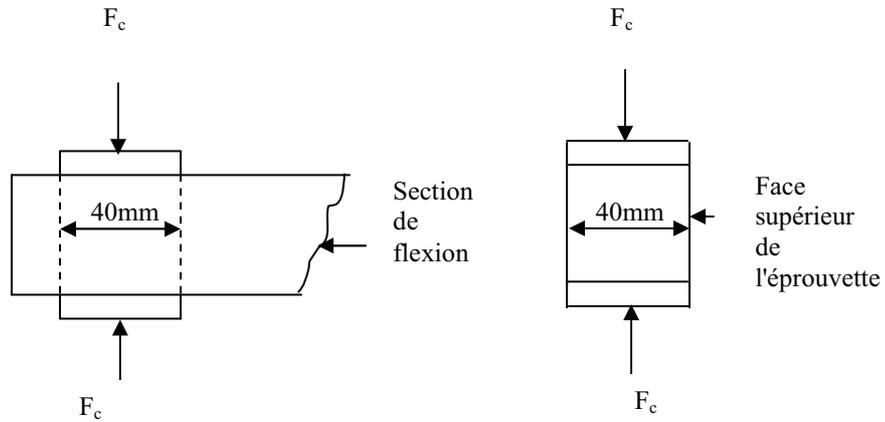


Fig IV.2. Dispositif de rupture en compression [55]

La résistance à la compression est calculée selon l'équation (4.2) suivante :

$$R_c = F_c / b^2 \dots\dots\dots(4.2)$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa);

F_c : Charge de rupture en (N);

b : Côte de l'éprouvette est égal à 40mm.

IV.3. Essai de résistance mécanique sur BSFM :

Pour cet essai il s'agit d'évaluer la résistance mécanique d'un béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques, pour cela nous avons effectués des essais de flexion et de compression pour différents mélanges.

Remarque :

Les bétons de sable sont référenciés de façon suivante :

- BSFM, I, T, L_f , D_{moy} , %; (exemple BSFM,2,(CPJ),30,1,1)
- BSSF.

Où :

- BSFM : Béton de sable renforcé de fibres métalliques ;

- I : Mode de conservation des éprouvettes (I=1 (conservation à l'air libre), I=2 (conservation à l'eau)) ;
- T : Type de ciment (CPJ ou CRS) ;
- L_f : Longueur de la fibre en (mm);
- D_{moy} : Diamètre moyen de la fibre en (mm) ;
- % : Dosage en volume des fibres;
- BSSF : Béton de sable sans fibres.

IV.3.1. Confection des éprouvettes et conditions de conservation :

Cette étude est menée sur des éprouvettes prismatiques (40x40x160mm). Les pâtes sont préparées à la main, la procédure de mélange à été faite de la manière suivante :

- Malaxage du sable sec (S) pendant une durée de 30 secondes;
- Introduction du ciment (C) puis malaxage pendant 60 secondes;
- Incorporation des fibres métalliques (F) par petites quantités tout en malaxant pour permettre aux fibres de se répartir d'une façon homogène dans le mélange (S) + (C) + (F);
- Ajout de la quantité d'eau (E) nécessaire mélangée avec un super plastifiant (P), puis malaxage de l'ensemble (S) + (C) + (F) + (E) + (P) durant 3min.

Le remplissage des moules est réalisé en deux couches avec vibration pour chaque couche. Les éprouvettes sont conservées à l'air libre aux conditions ($T = 25^{\circ}\text{C}$, HR = 65%), puis démoulées au bout de 24 heures et plongées dans l'eau pendant une durée de 14 jours aux conditions ($T = 25 \pm 2^{\circ}\text{C}$); ensuite les éprouvettes sont retirées de l'eau et exposées à l'air libre du laboratoire aux conditions ($T = 30 \pm 5^{\circ}\text{C}$, HR = $40 \pm 10\%$), jusqu'à la date d'essai. En effet, des études antérieures KRIKER [9], a constaté que d'une façon optimale une durée d'humidification initiale de 14 jours est nécessaire, pour améliorer les performances mécaniques des bétons dans les climats chauds et secs. Le nombre d'éprouvettes par essai et par échéance est de six (06), les éprouvettes sont préparées à différentes échéances (28, 90,180) pour subir les essais suivants :

IV.3.2. Essai de traction par flexion :

Cet essai est exécuté par une machine désignée pour les tests de flexion, sur les éprouvettes de béton de sable ou de mortiers 40x40x160mm, photo (IV 1,2) (annexe) selon le dispositif cité en (IV.2.1). La capacité maximale de cette machine est de 10 kN, le taux de chargement constant est égal de 2.67 kN/min.

IV.3.2.1. Résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ 32.5) :

Le tableau (IV.1) présente les résultats de la Résistance à la flexion du BSFM à base du ciment (CPJ 32.5)

Tableau IV 1. Résistance à la flexion du BSFM en ciment (CPJ 32.5)

Fib (%)	Age (jours)	Dmoy (mm)	R _f (MPa)		Dmoy (mm)	R _f (MPa)	R _f (MPa) Sans fibres
			L _f (mm)			L _F	
			30	60		40	
1	28	1	5.98±0.36	7.11±0.42	0.28	8.03±0.48	5.60±0.41
	90		6.80±0.53	7.71±0.53		8.33±0.67	6.40±0.32
	180		7.37±0.38	7.90±0.38		8.43±0.64	6.77±0.24
1.5	28		6.26±0.66	7.15±0.63		8.18±0.75	/
	90		6.95±0.45	7.82±0.57		8.68±0.39	
	180		7.43±0.25	8.18±0.53		8.74±0.57	

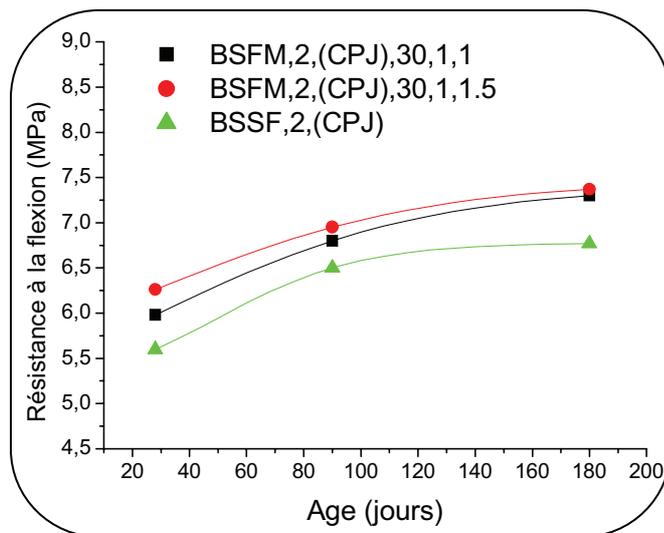


Fig IV 3. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CPJ,L_f=30mm) en fonction d'âge

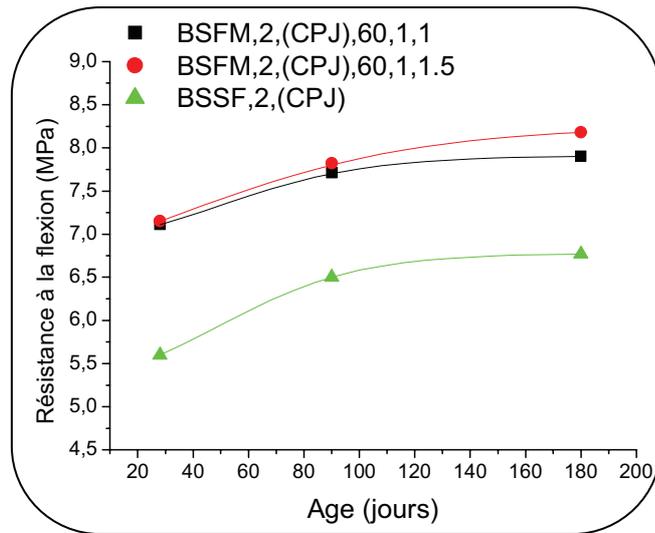


Fig IV 4. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge

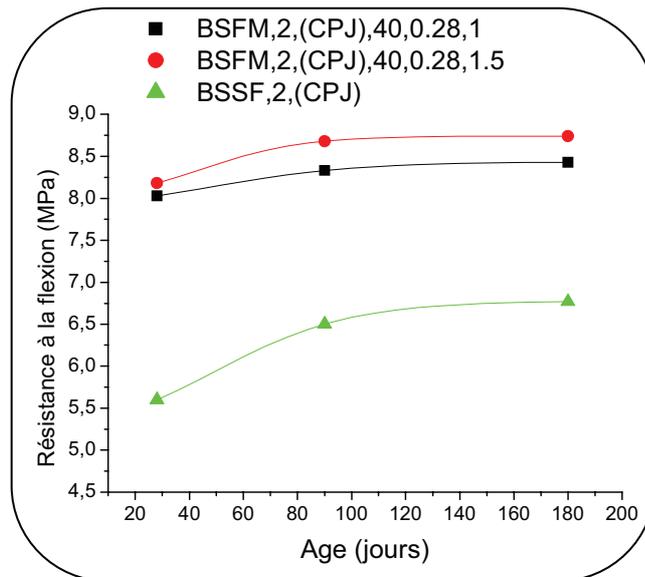


Fig IV 5. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge

a)- Discussion des résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ 32.5) :

Une fois que nous avons achevé la campagne d'essais de flexion, avec comme objectif l'étude de l'influence des caractéristiques géométriques et de la nature des fibres sur la résistance à la flexion. Les figures (IV.3, 4, 5), montrent qu'il y'a effectivement une amélioration de la résistance à la flexion du béton de sable renforcés par les fibres

métalliques par rapport au béton témoin. De ce fait la figure (IV.1), montre que le béton de sable est peu influencé par la présence des fibres de dimensions respectifs ($L_f = 30\text{mm}$, $D_{\text{moy}} = 1\text{mm}$). Toute fois nous signalons une augmentation de la résistance à la flexion de l'ordre de 9 à 10%, avec des dosages respectifs de 1 et 1.5% de fibres en volume, et à l'âge de 180 jours. Mais quant à l'influence du taux de fibres incorporées, nous remarquons d'après les résultats obtenus qu'il n'y a pas d'influence palpable sur la résistance à la flexion.

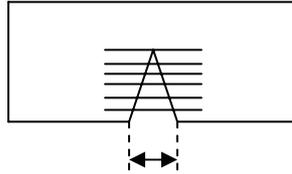
Pour la fibres de longueur ($L_f = 60\text{mm}$), et de même diamètre que la précédente, la figure (IV.2), montre une augmentation significative de la résistance à la flexion du BSFM par rapport au béton témoin, qui à notre avis significative, de l'ordre de 17 à 21% à 180 jours, sachant que seul le facteur longueur de la fibre à changer par rapport à la précédente. Nous constatons que lorsque la longueur de la fibre augmente, les valeurs des forces relatives à la charge ultime sont plus élevées, ceci est lié à l'augmentation de l'effort d'ancrage des fibres de longueurs ($L_f = 60\text{mm}$), mais aussi aux orientations plus favorable des fibres longues à cause des effets de parois dus aux dimensions de moule. Par contre, l'augmentation de la résistance à la flexion est légèrement influencée par le taux d'incorporation des fibres.

Pour la fibres de dimensions ($L_f = 40\text{mm}$, $D_{\text{moy}} = 0.28\text{mm}$), la figure (IV.3), montre une augmentation notoire de la résistance à la flexion du BSFM par rapport au béton sans fibres (témoin), de l'ordre de 25 à 29%, avec les même conditions d'âge et de dosages que précédemment.

Ces résultats obtenus nous permettent de tirer un enseignement quant à l'influence positive de l'élanement des fibres sur les performances du béton de sable; donc cette augmentation de la résistance à la flexion est liée vraisemblablement à l'amélioration de la résistance à l'arrachement des fibres de la matrice, qui, retarde l'apparition des micro fissures, ce qui induit une augmentation de la résistance.

D'après nos constatations les meilleurs résultats de la résistance à la flexion sont obtenus par la fibre de longueur ($L_f = 40\text{mm}$) et de diamètre ($D_{\text{moy}} = 0.28\text{mm}$); ceci peut être expliqué par le fait que cette dernière présente un ancrage assez suffisant et un élanement important, favorisant l'augmentation de la résistance. En outre nos

observations relatives à la taille d'ouverture des fissures en fonction du chargement confirment les constatations sus citées. En effet, les éprouvettes renforcées par les fibres métalliques de longueur $L_f = 40$ mm ne présentent aucune fissure détectable à l'œil nu. Par contre pour $L_f = 30$ mm, la taille est très importante, tandis que pour $L_f = 60$ mm elle est petite, voir schéma explicatif, Fig (IV.6).



La taille de la fissure

Fig IV 6. Détail d'une fissure

IV.3.2.2. Résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CRS 42.5) :

Le tableau (IV.2) présente la Résistance à la flexion du BSFM à base du ciment (CRS 42.5).

Tableau IV 2. Résistance à la flexion du BSFM en ciment (CRS 42.5)

Fib (%)	Age (jours)	Dmoy (mm)	R _f (MPa)		Dmoy (mm)	Fib (%)	R _f (MPa)	R _C (MPa)
			L _f (mm)				L _F	Sans fibres
			30	60			40	
1	28	1	6.15±0.12	7.50±0.50	0.28	0.5	6.26±0.42	5.56±0.39
	90		7.80±0.43	8.18±0.39			8.12±0.52	7.02±0.45
	180		7.80±0.35	8.40±0.43			8.40±0.23	7.20±0.46
1.5	28		6.21±0.29	7.33±0.6		1	8.10±0.45	/
	90		7.96±0.40	8.53±0.32			8.66±0.27	
	180		7.96±0.34	8.71±0.22			8.92±0.63	

Remarque :

Nous avons utilisé le ciment CRS 42.5, pour avoir une idée sur l'amélioration des performances mécaniques du béton de sable de dunes renforcées par des fibres métalliques, à base de ce type de ciment. Dans le but d'étudier ultérieurement la durabilité de ce matériau composite en contact direct avec un milieu agressif, notamment les sols sulfatés des fondations dans les zones de Ouargla.

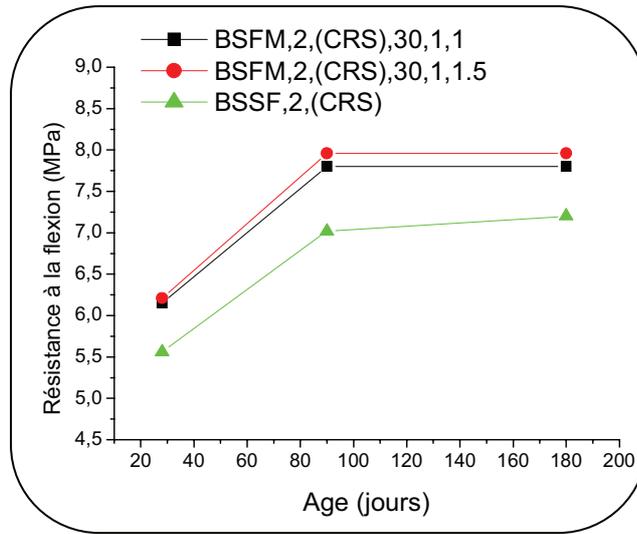


Fig IV 7. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CRS, Lf=30mm) en fonction d'âge

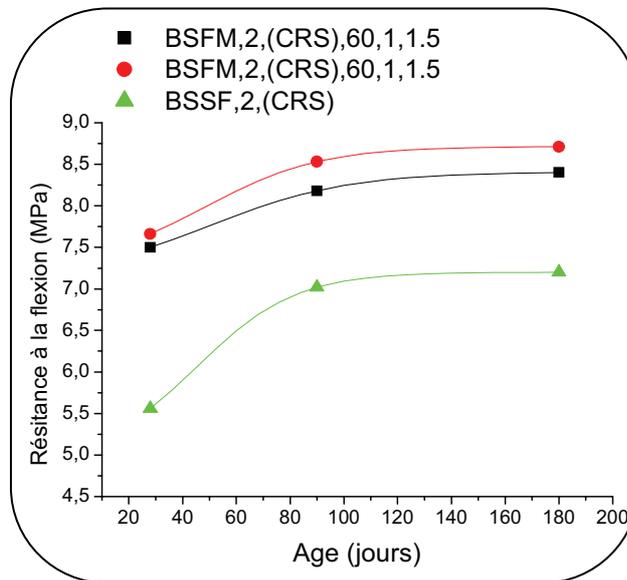


Fig IV 8. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CRS, Lf=60mm) en fonction d'âge

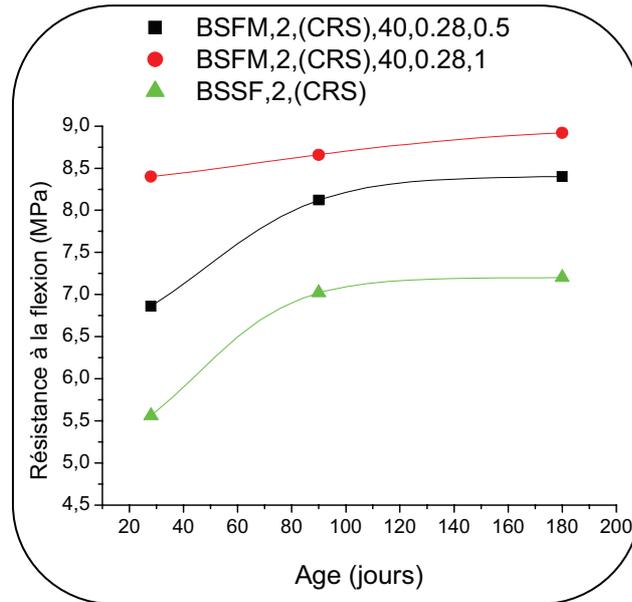


Fig IV 9. Variation de la résistance à la flexion du BSFM(CRS,Lf=40mm) en fonction d'âge

a)- Discussion des résultats de la résistance à la flexion du BSFM

(CRS 42.5) :

Des essais de flexion ont été effectués cette fois-ci sur du BSFM à base de ciment (CRS 42.5). Pratiquement dans les mêmes conditions de laboratoire que précédemment. Les figures (IV 7,8,9), montrent qu'il y'a une amélioration de la résistance à la flexion du BSFM par rapport au béton témoin, du même ordre de grandeur que celles confectionnée par le ciment CPJ, et aussi un accroissement de la résistance en fonction de l'âge (la résistance n'a pas chuté en fonction du temps) CRS. De ces faits, ces fibres métalliques peuvent être utilisées comme renfort dans les bétons destinés à la réalisation des fondations, de ce fait, des essais de durabilité à long terme sont vivement recommandés, pour mettre en épreuve l'efficacité de ces fibres dans l'amélioration des performances des fondations.

L'amélioration obtenue de la résistance à la flexion par l'incorporation des fibres métalliques est en accord avec la plupart des travaux de chercheurs dans la littérature.

IV.3.3. Essai de compression :

Cet essai est exécuté par une machine Universelle MP12 de marque Oehlgass, photo (IV 3,4) (annexe), qui à une force de pression variant de 0 à 120 kN, une vitesse de

déplacement réglée de façon continue. Dans notre cas la mesure de la force de pression est réalisée à une faible vitesse de déplacement (0.1 à 0.3mm/min).

IV.3.3.1. Résultats de la résistance à la compression du BSFM (CPJ32.5)

Le tableau (IV.3) présente les résultats de la résistance à la compression du BSFM à base de ciment (CPJ 32.5)

Tableau IV 3. Résistance à la compression du BSFM en ciment (CPJ 32.5)

Fib (%)	Age (jours)	Dmoy (mm)	Rc(MPa)		Dmoy (mm)	Rc (MPa)	R _C (MPa)
			L _f (mm)			L _F	Sans fibres
			30	60		40	
1	28	1	26.73±1.32	30.54±1.44	0.28	33.21±1.23	25.80±1.20
	90		29.63±2.02	32.16±2.14		36.37±1.8	26.42±0.43
	180		29.70±1.41	32.66±1.82		36.50±1.51	26.67±0.95
1.5	28		27.26±1.30	30.94±1.34		38.59±0.93	/
	90		30.01±2.07	33.96±2.3		39.72±2.7	
	180		30.20±0.76	34.14±1.23		41.49±2.23	

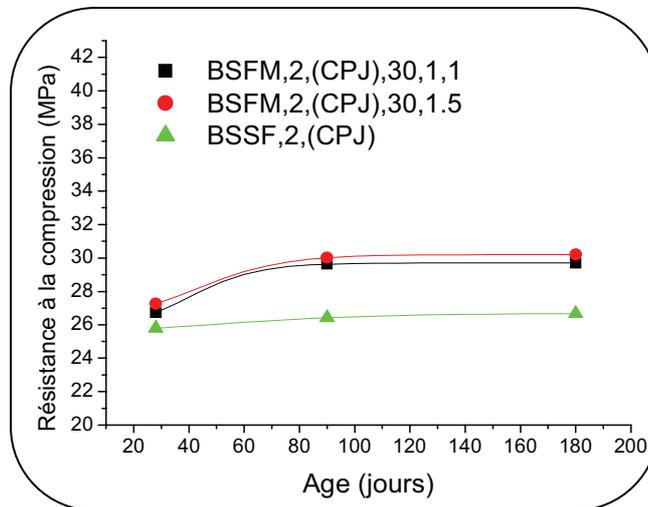


Fig IV 10. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CPJ,Lf=30mm) en fonction d'âge

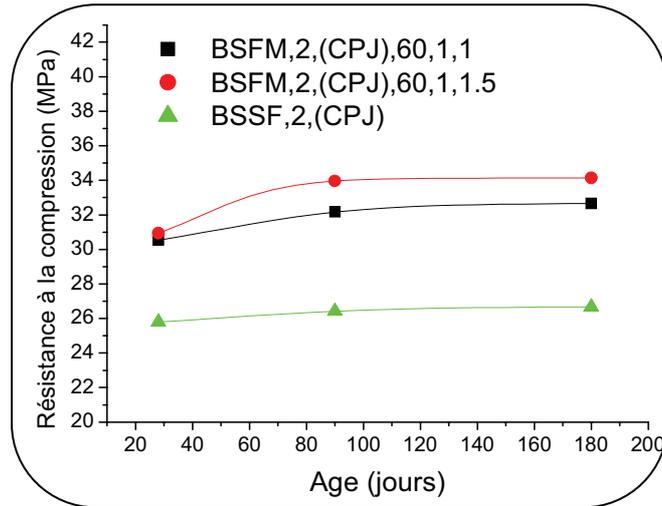


Fig IV 11. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge

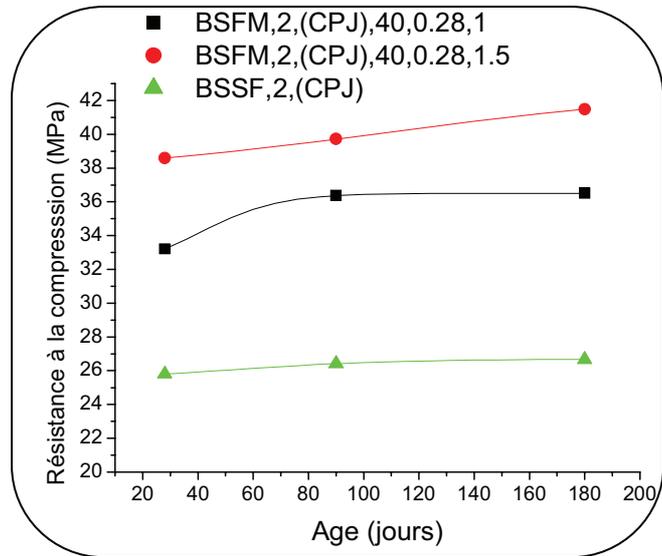


Fig IV 12. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge

a)- Discussion des résultats de la résistance à la compression du BSFM (CPJ 32.5) :

D'après les résultats obtenus, les figures (IV 10, 11,12), montrent qu'il y'a une amélioration de la résistances à la compression du BSFM par rapport au béton témoin. La figure (IV.7), montre une légère augmentation de la résistance à la compression du BSFM de longueur $L_f = 30\text{mm}$, par rapport au béton sans fibres (témoin), qui est de l'ordre de 11 à 13%, avec les dosages respectifs de 1 et 1.5% de fibres en volume, à 180 jours. Cette augmentation est due probablement à la présence d'un bon nombre de

fibres, ayant une bonne orientation au sein de la matrice, ce qui favorise l'augmentation de la résistance à la compression.

Concernant la contribution des fibres de longueur ($L_f=60\text{mm}$), la figure (IV.8), montre une augmentation relativement importante de la résistance à la compression du BSFM par rapport au béton témoin, de l'ordre de 22 à 28%, avec les mêmes conditions (âge, dosages) que précédemment. Cette augmentation est due au fait que la longueur de la fibre est supérieure à la largeur du moule ($40\times 40\times 160\text{mm}$); de là les fibres ont tendance à s'orienter dans le sens de la longueur de l'éprouvette. De ce fait, lors de l'écrasement de cette dernière la charge sera perpendiculaire aux fibres, réduisant ainsi la fissuration des bielles et augmentant la résistance à la compression.

Pour la fibre de longueur ($L_f=40\text{mm}$), de diamètre ($D_{\text{moy}}=0.28\text{mm}$), la figure (IV.9), montre une nette augmentation de la résistance à la compression du BSFM par rapport au béton sans fibres, de l'ordre de 37 à 55%, avec les mêmes conditions (âge et dosages) que précédemment. Cette augmentation est due à notre avis à l'efficacité des fibres noyées dans la matrice, de part leur petit diamètre qui favorisent la création d'un réseau solidaire, du fait du nombre très important des fibres, jouant ainsi le rôle d'un frein devant le développement des microfissures, ce qui se traduit par une augmentation significative de la résistance à la compression.

Quoique la plus part des chercheurs, selon la littérature, observent une diminution de la résistance à la compression du BSFM par rapport à un béton non fibré, à l'exception d'une orientation préférentielle, nous avons comme même enregistré une nette amélioration de la résistance à la compression.

Les résultats obtenus sont en accord avec ceux de AIT-TAHAR [61], dans une étude expérimentale qui montre une amélioration importante de la résistance à la compression, allant jusqu'à une augmentation de 52% par rapport au béton témoin.

IV.3.3.2. Résultats de la résistance à la compression du BSFM (CRS 42.5) :

Le tableau (IV.4) présente les résultats de la résistance à la compression du BSFM a base de ciment (CRS 42.5).

Tableau IV 4. Résistance à la compression du BSFM en ciment (CRS 42.5)

Fib (%)	Age (jours)	D _{moy} (mm)	Rc (MPa)		D _{moy} (mm)	Fib (%)	Rc (MPa)	R _C (MPa)
			L _f (mm)				L _F	Sans fibres
			30	60			40	
1	28	1	32.92±1.48	36.6±2.20	0.28	0.5	35.67±0.69	26.48±0.84
	90		38.37±1.00	40.08±0.53			36.36±1.84	27.52±2.03
	180		38.40±1.00	40.20±2.39			36.87±1.03	27.6±1.40
1.5	28		36.15±1.48	38.10±1.94		1	37.50±1.9	/
	90		39.86±1.43	42.41±1.52			42.18±1.55	
	180		40.00±1.55	42.41±2.17			42.18±1.66	

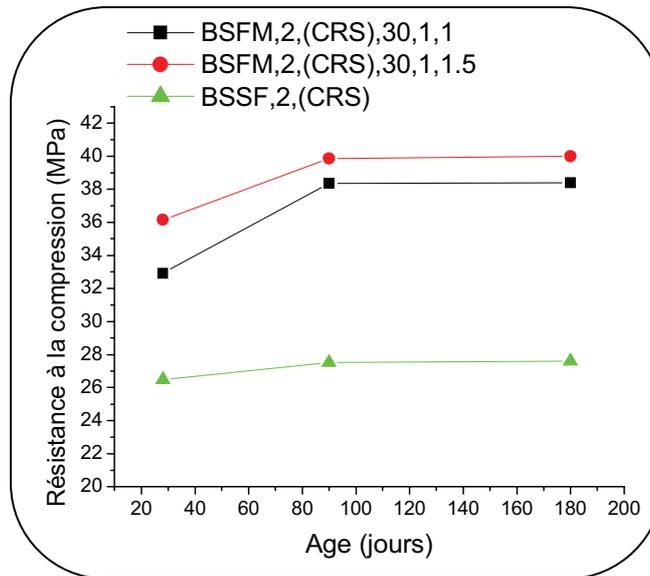


Fig IV 13. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CRS,Lf=30mm) en fonction d'âge

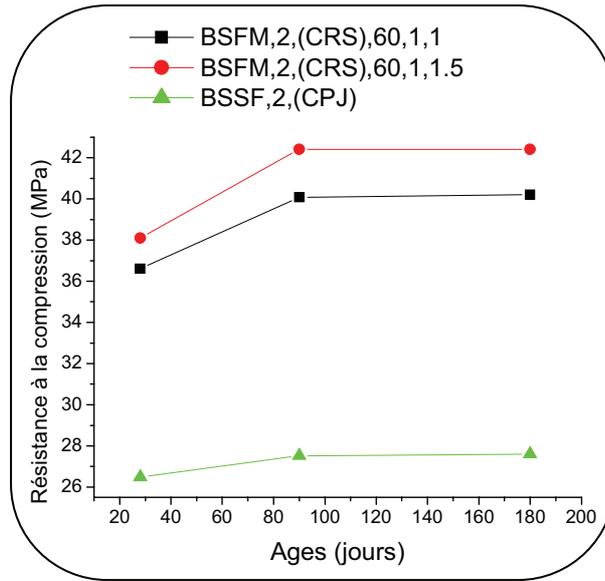


Fig IV 11. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CRS,Lf=60mm) en fonction d'âges

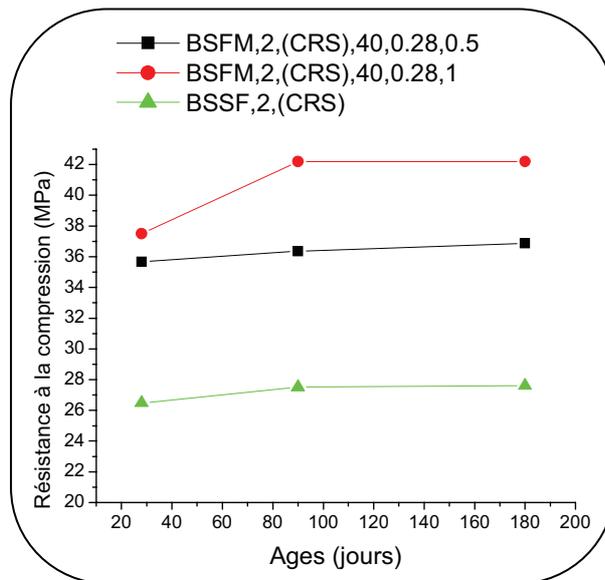


Fig IV 12. Variation de la résistance à la compression du BSFM(CRS,Lf=40mm) en fonction d'âges

a)- Discussion des résultats de la résistance à la compression du BSFM (CRS 42.5) :

Les essais de compression du BSFM à base de ciment (CRS 42.5), ont abouti à des résultats présentés sur les figures (IV 13, 14, 15). D'après ces résultats, nous constatons qu'il y'a une nette amélioration de la résistance à la compression du BSFM, par rapport à celle du béton témoin, de l'ordre de 39 à 45% pour $L_f = 30\text{mm}$, de 46 à 54% pour

$L_f=60\text{mm}$, avec des dosages de 1 et 1.5% de fibres en volume, et de 34 à 53% pour $L_f=40\text{mm}$, avec des dosages de 0.5 et 1% de fibres en volume. Une fois encore nous constatons l'influence positive des fibres métalliques dans l'amélioration de la résistance à la compression; de ce fait, nous pensons que ces fibres peuvent être utilisées dans la réalisation du béton, en particulier pour la réalisation des fondations et des plateformes, vu les résultats encourageants obtenus en compression. Mais après tout sa nécessité une étude complète sur la durabilité de ce matériau dans les milieu agressifs.

IV.4. Etude de l'influence des FM sur le retrait du béton de sable dans les conditions chaudes et sèches :

IV.4.1. Introduction :

Le béton de sable est un mélange de matière solide, inertes, de dimension différentes assemblées entre elle par l'intermédiaire d'un liant qui est le plus souvent composé d'un ciment, poudre minérale, qui, en présence de l'eau s'agglomère pour acquérir les qualités d'une matière solide; l'agrégat étant généralement stable aux propriétés classiques, c'est au ciment que sont dues pour la plus grande part, les anomalies physico mécaniques qui font la différence entre le comportement du béton et celui des solides habituels [62]. Les changements que subit le béton au cours de son existence fait que ses propriétés sont en perpétuelle évolution.

Selon les conditions de conservation (température) ou l'état de l'atmosphère, le béton laisse évaporer une partie de l'eau de gâchage, ou au contraire il absorbe l'humidité de l'air. Ainsi le béton sera le siège de transformations diverses :

- variations dimensionnelles (retrait, gonflement) ;
- fluage sous charge maintenue.

La variation dimensionnelle est souvent aggravée dans les conditions climatiques chaudes et sèches; le béton présente dans ces conditions des retraits et des fissurations très importantes. De ce fait, le renforcement du béton par des fibres peut offrir des solutions techniques pour réduire ces variations dimensionnelles. Avant d'exposer les

résultats expérimentaux sur les bétons de sable renforcés de fibres métalliques, nous allons donner quelques notions sur le retrait.

IV.4.2. Les différents types de retrait :

Généralement il existe deux types de retrait :

- Retrait avant prise finale;
- Retrait après prise finale.

Le retrait avant prise est généralement lié à la nature et le dosage en ciment ainsi que les conditions de conservation qui peuvent provoquer une évaporation d'eau de gâchage.

Le retrait après prise est en général en fonction de la perte en eau du béton par évaporation. Dans ce qui suit nous allons donner les principaux types de retrait.

IV.4.2.1 Retrait libre :

En l'absence de toute charge, le béton se déforme spontanément. Ces déformations sont liées aux conditions de conservations (température et humidité). Pour les bétons conservés à l'air, on observe une diminution des dimensions initiales. Ce phénomène porte le nom de retrait. Par contre dans l'eau parfois se produit une absorption d'eau et un gonflement. Dans l'air saturé d'humidité, on observe soit une absorption d'eau (gonflement) soit une perte d'eau (retrait). Enfin dans l'air non saturé il se produit toujours une perte d'eau et un retrait [63].

IV.4.2.2 Retrait endogène :

Il est lié aux modifications de la structure de la pâte de ciment vieillissante (hydratation, carbonatation). C'est la déformation d'un matériau vieillissant (faisant prise et durcissant) sans échange d'eau avec l'extérieur [10].

Bien que le retrait endogène soit tridimensionnel, il est généralement exprimé comme une déformation linéaire, ce qui permet de le comparer avec le retrait de séchage [33].

IV.4.2.3. Retrait de dessiccation :

Il est lié aux mouvements de l'eau entre le béton et le milieu extérieur (séchage ou humidification) et peut même se manifester dans le cas d'une redistribution hygrométrique à l'intérieur d'une pièce sans qu'il y ait pour autant un échange avec l'extérieur [10].

IV.4.2.4. Gonflement :

La pâte de ciment ou le béton mûris continuellement dans l'eau après leur mise en place augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est dû à l'absorption d'eau par le gel de ciment. Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement [33].

IV.4.2.5. Retrait de séchage :

L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans de l'air non saturé provoque du retrait dit de séchage.

Le changement de volume d'un béton en cours de séchage n'est pas égal au volume d'eau évaporée. La perte de l'eau libre ayant lieu au début entraîne peu ou pas de retrait. Mais par contre avec la poursuite du séchage l'eau adsorbée disparaît et le changement de volume de la pâte hydratée non bloqué correspond approximativement à cette étape [33].

IV.4.3. Les facteurs influant sur l'amplitude du retrait [63] :

IV.4.3.1. Composition de béton :

L'amplitude du retrait croit avec :

- la quantité d'eau de gâchage utilisée ;
- les vides d'air dus à un mauvais serrage ;
- la présence d'éléments fins ;
- la finesse de mouture de ciment, car cela nécessite une quantité d'eau de gâchage plus importante;
- Le dosage en ciment; le retrait augmente avec l'augmentation du dosage.

IV.4.3.2. Nature de ciment :

Les ciments finement broyés présentent un retrait plus grand que ceux qui ont été broyés grossièrement. Il y'a aussi l'influence de la composition minéralogique du ciment sur le retrait, surtout si le ciment est riche en aluminat tricalcique.

Par ailleurs le chlorure de calcium qui entre dans la composition de certains ciments et dans celles de certains entraîneurs d'air, et qui est employé en tant qu'antigel et accélérateur de prise et de durcissement peut influencer défavorablement sur le retrait.

Malheureusement, ce sel augmente considérablement le retrait du béton. Si l'on met 1.5% de Ca Cl_2 du poids de ciment le retrait d'un béton dosé à 300 kg de ciment augmente de 20%, l'augmentation sera de 40% si le ciment contient 2% et elle est de 60% si le ciment contient 3% de $\text{Cl}_2 \text{ Ca}$.

IV.4.4. Variation dimensionnelle de béton de sable de dune :

IV.4.4.1. But de l'essai :

Dans le présent travail le but est d'étudier le comportement de béton de sable de dune renforcé par des fibres métalliques issues des pneus usés vis-à-vis des variations dimensionnelles (retrait, gonflement).

IV.4.4.2. Essai de retrait libre :

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 15-433, l'appareil de mesure de retrait utilisé dans nos essais est un rétractomètre, photo (IV .5) (annexe); il est muni d'un comparateur mesurant les déplacements suivant l'axe longitudinal des éprouvettes 40x40x160mm, entre deux plots métalliques noyés dans le mortier. Les mesures de valeurs initiales (de référence) étaient faites après 24h au moment de démoulage; l'étalonnage du rétractomètre est effectué par une tige de contrôle métallique en invar, qui sert de base de mesure. L'incertitude des mesures est évaluée à $\pm 5 \mu\text{m/m}$. la valeur retenue du retrait représente la moyenne arithmétique de trois mesures.

Ces essais sont relatifs aux mesures, entre 1 et 28 jours, les résultats obtenus sont comparés avec ceux de la littérature. La conservation des éprouvettes de mortier est réalisée en deux modes :

1^{er} mode :

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre au sein même du laboratoire à une température ($T = 30 \pm 5^\circ\text{C}$) et une humidité relative ($HR = 40 \pm 10\%$), est cela pendant une durée de 28 jours.

2^{ème} mode :

Les éprouvettes cette fois-ci sont conservées en premier lieu dans l'eau à une température ($T = 25 \pm 5^\circ\text{C}$), est cela durant 14 jours, ensuite elles sont exposées à l'air libre du laboratoire pour une durée de 14 jours.

a)- Résultats du 1^{er} mode :

Sept types de mélanges dont le témoin ont été testés, le tableau IV 5 et les figures (IV 16, 17, 18) représentent les résultats du retrait du 1^{er} mode.

Tableau IV 5. Résultats du retrait (1^{er} mode)

Eprouvettes	Retrait à 28 jours $\mu\text{m}/\text{m}$	Retrait exprimé en pourcentage de l'éprouvette témoin (sans fibres)
BSSF	1576.42	100%
BSFM, 30, 1, 1	1440.47	91%
BSFM, 30, 1, 1.5	1400.62	89%
BSFM, 60, 1, 1	1370.63	87%
BSFM, 60, 1, 1.5	1330.27	84%
BSFM, 40, 0.28, 1	1160.73	74%
BSFM, 40, 0.28, 1.5	1050.80	67%

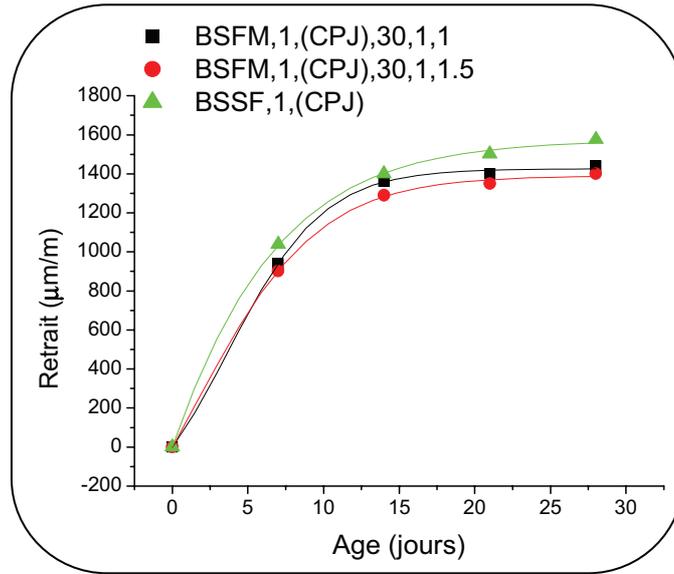


Fig IV 16. Variation du retrait du BSFM(CPJ,Lf=30mm) en fonction d'âge

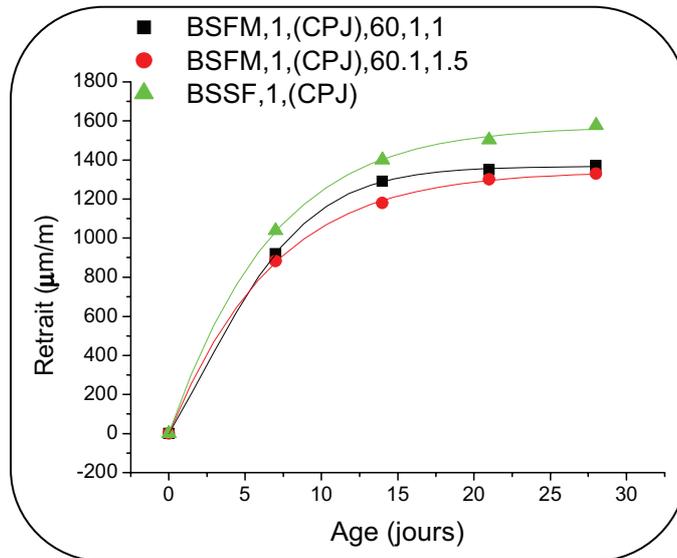


Fig IV 17. Variation du retrait du BSFM(CPJ,Lf=60) en fonction d'âge

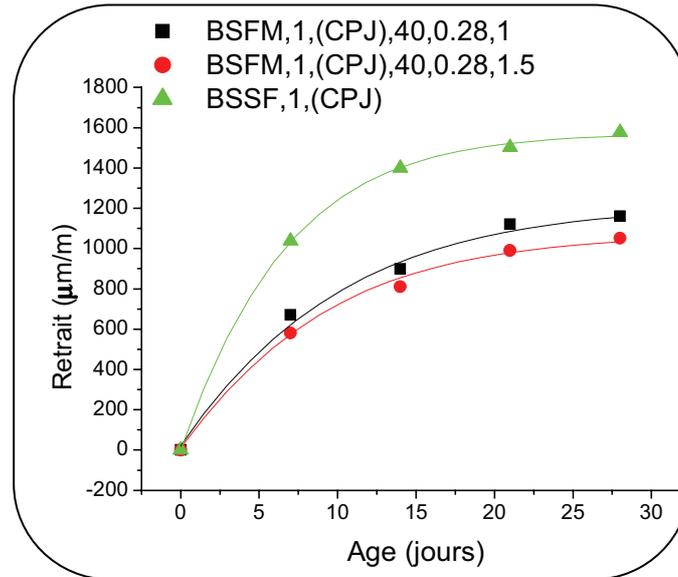


Fig IV 18. Variation du retrait du BSFM(CPJ,Lf=40) en fonction d'âge

b)- Discussion des résultats (1^{er} mode) :

D'après les résultats présentés sur les figures (IV 16, 17,18), nous constatons que les fibres métalliques diminuent le retrait; cette diminution est de l'ordre de 9 à 11% pour $L_f = 30\text{mm}$, de 13 à 16% pour $L_f = 60\text{mm}$ et de 26 à 33% pour $L_f = 40\text{mm}$, par rapport au béton sans fibres (témoin) à 28jours.

Quant aux taux de fibres incorporées nous remarquons qu'il y'a peu d'influence, de l'ordre de 2 à 3%, pour les fibres de longueurs respectives (30,60mm), et de l'ordre de 7% pour $L_f = 40\text{mm}$. Cette réduction est due à notre avis à la bonne adhérence des fibres avec la matrice, à la forme et à la quantité de fibres. Enfin, nous pouvons dire que les résultats trouvés confirment ceux déjà obtenus par d'autres chercheurs à savoir:

SWAMY et STAVRIDES [64]. Ils indiquent que l'ajout des fibres d'acier au béton permet de réduire le retrait hydraulique de 20%.

SOROKA [65], met en évidence que le retrait hydraulique des bétons classiques est souvent amplifié par les conditions climatiques chaudes et sèches, mais il a constaté que dans ce climat, le renforcement des bétons par les fibres d'acier,de verre ou de polymère est efficace pour la réduction du retrait.

c)- Résultats du 2^{ème} mode :

Le tableau (IV.6), présente les résultats du gonflement-retrait des éprouvettes conservées à l'eau.

Tableau IV 6. Résultats du gonflement-retrait (2^{ème} mode)

L (mm)	D _{moy} (mm)	%Fib	Age (jours)	3	7	14	21	28
30	1	1	Gonflement Retrait (µm/m)	68.74	406.19	700.46	380.18	-62.49
		1.5		118.80	281.28	406.25	100.28	-206.33
60		1		306.53	494.12	681.60	360.90	-56.31
		1.5		100.13	240.95	500.43	190.28	-62.59
40	0.28	1		382.22	690.13	770.1	400.53	-57.72
		1.5		394.68	631.40	700.60	332.03	-37.58
Sans fibres				782.64	525.93	281.75	-93.91	-369.40

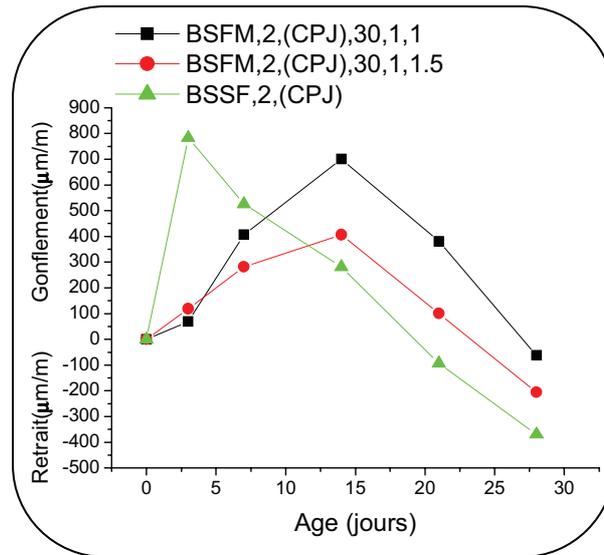


Fig IV 19 Variation du gonflement-retrait du BSFM(CPJ, L_f=30mm) en fonction d'âge

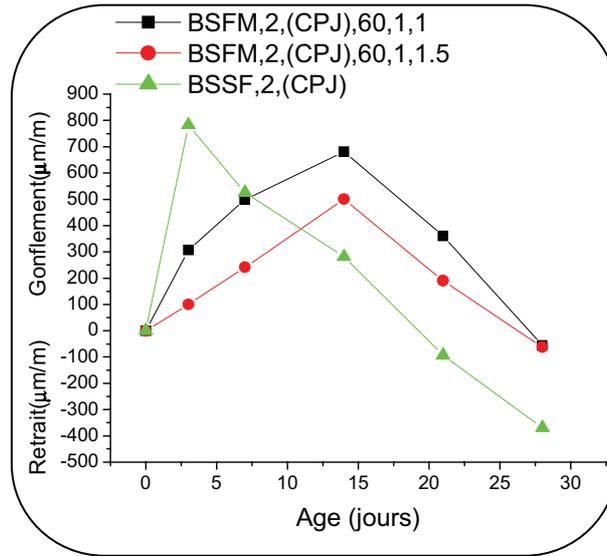


Fig IV 20. Variation du gonflement-retrait du BSFM(CPJ, $L_f=60\text{mm}$) en fonction d'âge

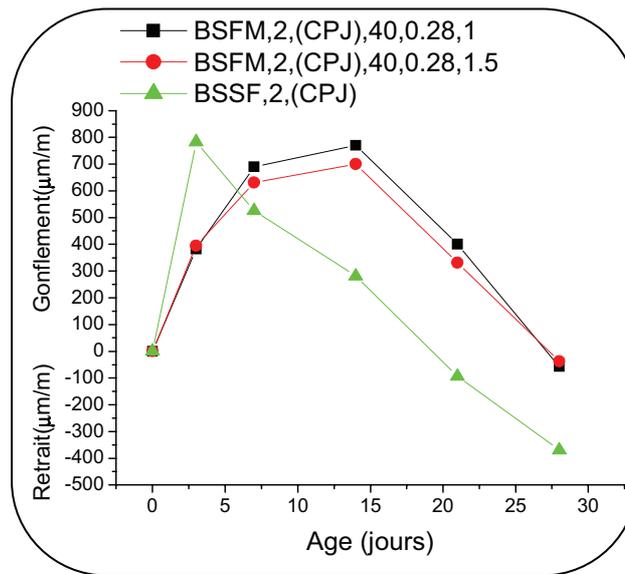


Fig IV 21. Variation du gonflement-retrait du BSFM(CPJ, $L_f=40\text{mm}$) en fonction d'âge

d)- Discussion des résultats (2^{ème} mode) :

Pour le deuxième mode (éprouvettes conservées à l'eau), les résultats obtenus sur les figures (IV 19, 20,21), montrent une diminution du retrait à 28 jours, du béton de sable renforcés par fibres métalliques par rapport au béton non fibré, ceci est confirmé par des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait à savoir:

EDINGTON et ALL [44], EL HACHEM [66], ont montré que le retrait du béton de fibres métalliques est généralement plus petit que celui du béton non fibré.

Les figures (IV 19, 20, 21), montrent que les fibres ont contribué à la diminution du gonflement dans l'eau par rapport au béton témoin. En outre, nous avons enregistré un gonflement relativement long pour les bétons de fibres. Par contre le béton témoin à présenter un gonflement rapide et un retrait précoce après 3jours.

En plus, si nous comparons le retrait à 28jours des bétons de 1^{er} mode et ceux du 2^{eme} mode, nous constatons que les éprouvettes conservées à l'eau (2^{eme} mode) présentent un retrait inférieur, ce qui confirme l'efficacité d'une humidification initial dans l'eau de 14jours.

IV 4.4.3. Résultats de la perte en poids :

Sachant que le retrait est lié à la perte en eau des essais dans ce sens sont réalisés. Le tableau (IV.7), présente les résultats de la perte en poids.

Tableau IV 7. Résultats de la perte en poids

L(mm)	D_{moy} (mm)	%Fib	Age (jours)	14	21	28
30	1	1	Perte en poids (%)	0	2.44	3.78
		1.5		0	2.47	3.86
60		1		0	2.34	3.52
		1.5		0	2.40	3.76
40	0.28	1		0	2.78	3.89
		1.5		0	2.88	3.90
Sans fibres				0	2.83	3.45

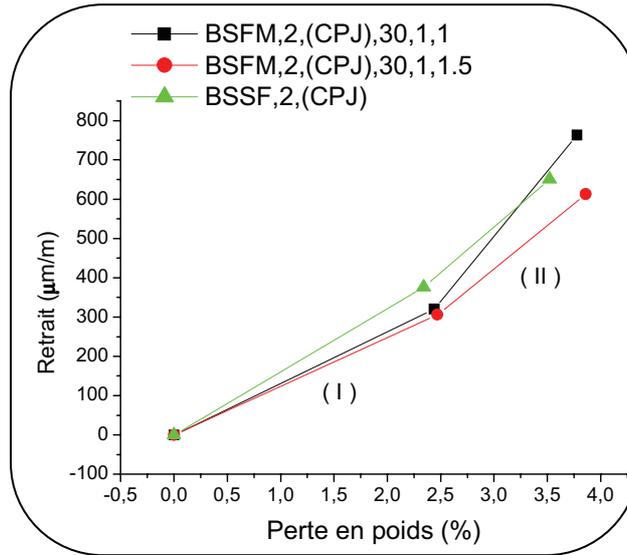


Fig IV 22. Variation du retrait du BSFM(CPJ,L_f=30mm) en fonction de perte en poids

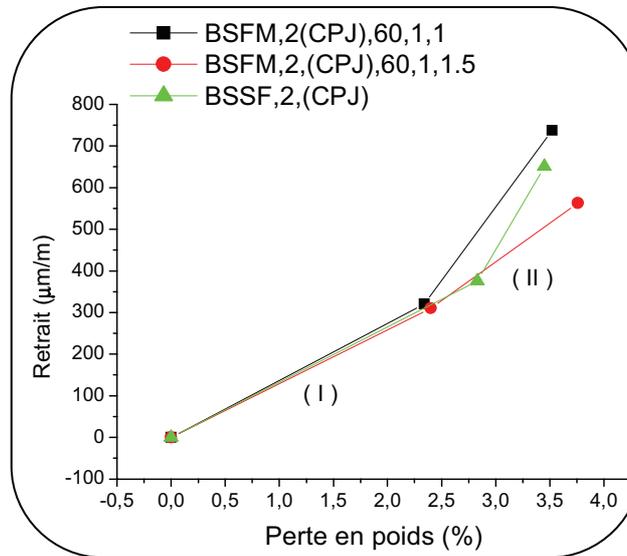


Fig IV 23. Variation du retrait du BSFM(CPJ,L_f=60mm) en fonction de perte en poids

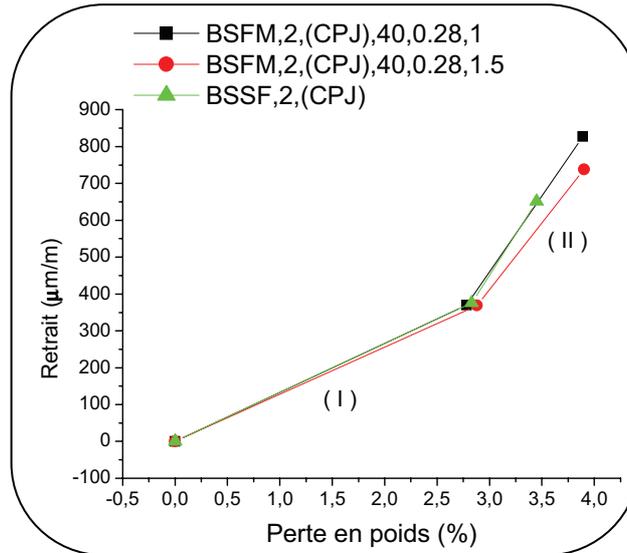


Fig IV 24. Variation du retrait du BSFM(CPJ, $L_f=40$ mm) en fonction de perte en poids

Le tableau (IV. 8), Présente les valeurs des pentes α_i et β_i .

Tableau IV 8. Résultats des pentes

L (mm)	D_{moy} (mm)	% Fib	α_i	β_i	
30	1	1	131.16	330.35	
		1.5	123.87	220.58	
60		1	136.88	258.12	
		1.5	129.23	185.93	
40		0.28	1	132.94	412.53
			1.5	127.90	361.77
Sans fibres			132.70	444.33	

a)- Discussion des résultats :

D'après les allures des courbes présentés sur les figures (IV 22, 23,24), nous remarquons que sur chaque courbe paraît deux zones (I, II), qui sont similaire à celle donnée par VERBRECK [10]; en effet, ces courbes sont caractérisées dans notre cas par deux zones linéaires, de pente respectives α_i et β_i . D'après les résultats de la pente de la zone (I), nous constatons que ces valeurs d'une manière générale sont proches les unes des autres. Par contre les valeurs des β_i , nous constatons qu'elles diminuent en fonction des taux de fibres incorporées.

VERBECK [10]; a obtenu la même allure sur pâte pure, en précisant que dans la première zone le retrait est dû au départ de l'eau du capillaires et que dans la deuxième zone le retrait est dû au départ de l'eau des pores.

De ce fait, les résultats obtenus, tableau (IV.8), montrent que les valeurs des pentes α_i du bétons renforcés de fibres métalliques sont proches à celle du béton non fibré. En effet, nous pensons que la présence des fibres métalliques dans la matrice n'a aucun effet significatif sur le volume global des capillarités.

Par contre les valeurs des pentes β_i du béton fibré sont inférieures à la valeur de β_i du béton sans fibres, ceci est dû à la présence des fibres qui favorisent le départ d'eau des pores d'une manière rapide d'où une réduction dans le retrait final. Cela est en conformité avec les constatations de VERBRECK.

IV 5. Conclusion :

Ce chapitre renferme l'ensemble des résultats expérimentaux sur les propriétés mécaniques (flexion, compression) et rhéologique (retrait). L'aboutissement à ces résultats, dont l'objectif est de répondre sur la question si oui ou non les fibres métalliques utilisées dans cette étude, ont une influence favorable sur le comportement du composite dans l'amélioration de ces caractéristiques; à cette question les résultats obtenus nous permet de statuer sur la contribution de ces derniers; en effet, les résultats montrent que l'association des fibres à la matrice, améliore les propriétés à la fois mécaniques et rhéologiques du béton de sable.

L'étude des propriétés mécaniques et rhéologiques du béton de sable fibré, est analysée dans le but de donner des explications sur le comportement observé, ainsi que sur l'efficacité des fibres dans l'amélioration de la résistance du composite en ce basant sur les résultats obtenus pour différents essais, nous avons conclu ce qui suit :

- ◆ La longueur des fibres est un paramètre important. Les fibres longues ont données des résultats supérieurs à ceux des fibres courtes de même diamètre.

- ◆ L'élanement des fibres joue un rôle positif, en effet, plus l'élanement augmente plus la résistance à l'arrachement des fibres de la matrice augmente, ainsi que leurs nombres à volume constant.

◆ Le taux d'incorporation des fibres à un rôle secondaire.

Le matériau composite renforcé par les fibres de diamètre $D_{\text{moy}} = 0.28\text{mm}$ a donné les meilleurs performances mécaniques et rhéologiques.

La résistance à la compression des BSFM augmente de manière significative, sachant que la majorité des auteurs, ont trouvé que les fibres métalliques d'une manière générale n'influent pas ou peu sur la résistance à la compression des bétons.

Les résultats encourageantes du point de vue résistance et retrait, nous permet de recommander l'incorporation massive de ces fibres dans les bétons de sable de dune. Et de présenter aussi sur une solution écologique à la valorisation des déchets pneumatiques afin de préserver de l'environnement.

Conclusions générales et recommandations

Notre recherche porte sur l'étude du comportement mécanique et rhéologique d'un béton de sable de dunes renforcées par des fibres. Pour la confection de ce dernier nous avons utilisé dans le cadre d'une valorisation le sable de dunes et des fibres métalliques issues des pneus usés, qui présentent des caractéristiques mécaniques élevées et une géométrie adéquate. Permettant d'atteindre les objectifs recherchés. Ainsi cette étude nous a permis de conclure que :

- ❖ Les pays économiquement émergeant, dont l'Algérie possèdent d'énormes déchets industriels entre autres les pneus usés, la valorisation de ces derniers dans le domaine de la construction reste insuffisante voir inexistante.
- ❖ La granulométrie de sable de dunes de par qu'elle est fine et serrée, présente des résultats intéressants de point de vue propreté et absorption.
- ❖ Les résultats des propriétés mécaniques des fibres métalliques issues de pneus usés sont acceptables, et en particulier la fibre de dimensions respectives ($L_f = 40\text{mm}$, $D_{\text{moy}} = 0.28\text{mm}$) qui a donné un module d'élasticité très élevé. Cela en comparaison avec ceux cités dans la littérature.
- ❖ L'augmentation des dosages et des longueurs des fibres métalliques issues de pneus usés dans le béton de sable de dunes à engendrer une diminution importante de l'ouvrabilité du mélange.
- ❖ L'utilisation du super plastifiant nous a permis l'incorporation des fibres tout en gardant le rapport E/C fixe, donc à maniabilité constante. Ce qui devrait permettre l'amélioration des performances à la fois mécaniques et rhéologiques.

- ❖ L'influence des caractéristiques physiques (géométriques) des fibres métalliques utilisées sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton de sable de dunes.
- ❖ La confection et la conservation des éprouvettes se sont déroulées pendant les six mois les plus chauds (à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre), dans les conditions de laboratoire ($T = 30 \pm 5^\circ\text{C}$, $\text{HR} = 40 \pm 10 \%$).
- ❖ L'augmentation de la résistance à la flexion concernant les différentes compositions des BSFM, que soit à base du ciment CPJ 32.5 où bien CRS 42.5 est satisfaisante par rapport au béton de sable de dunes témoin, et qui varie selon les dimensions et les dosages en fibres. En effet :
 - Les fibres longues ont enregistré des résultats supérieurs à ceux des fibres courtes de même diamètre, à cause de la variation de l'adhérence fibres-matrice.
 - Les fibres ayant un élancement important ont donné les meilleurs résultats du fait, de l'augmentation de la résistance à l'arrachement des fibres de la matrice et aussi de leurs nombres à volume constant.
 - Quant aux taux des fibres incorporées, ces derniers ont joué un rôle secondaire.
- ❖ Concernant la résistance à la compression des bétons de sable de dunes renforcés par des fibres métalliques, nous avons enregistré des augmentations très significative pour l'ensemble des compositions du BSFM par rapport au béton témoin, que soit à base du ciment CPJ32.5 où bien CRS42.5. Ces résultats encourageants nous permis d'avancer que les fibres métalliques issues de pneus usés possèdent le pouvoir d'adhérence et de conformité avec la matrice considérée. Bien que la plupart des auteurs de la bibliographie rapportent qu'en général l'incorporation des fibres diminue la résistance à la compression sauf pour ceux ayant une orientation préférentielle. C'est pour cette raison que nous

avons choisi une dimension d'éprouvette qui favorise une orientation perpendiculaire à la charge de compression, de ce fait nous avons enregistré une augmentation.

- ❖ De point de vue durabilité de ce matériau composite, nous n'avons pas enregistré de diminution de résistance à long terme (180jours), ni une corrosion des fibres dans la matrice cimentaire pour les ciments CPJ 32.5 où CRS 42.5. Ce qui augmente le champ d'applicabilité de ce matériau (panneaux, dalles, plateformes, fondations,...).
- ❖ Concernant le retrait, nous avons constaté que l'incorporation des fibres diminue celui-ci, cette diminution dépend des dimensions géométriques (longueur, diamètre) et les dosages des fibres. Les meilleurs résultats enregistrés sont donnés par la fibre de dimension respective ($L_f = 40\text{mm}$, $D_{\text{moy}} = 0.28\text{mm}$), allant jusqu'à 33% de réduction du retrait par rapport au béton de sable de dunes témoin. Ces résultats encourageants nous permis de bétonner dans les zones sahariennes.

Recommandations :

- ❖ Pour une valorisation rationnelle, la recherche d'un procédé de récupération à la fois de l'acier et du caoutchouc qui tient compte de l'aspect économique et environnemental est plus qu'indispensable.
- ❖ La correction de la granulométrie de sable de dunes s'avère nécessaire dans le but d'une utilisation courante de ce dernier dans la confection des bétons.
- ❖ Afin de mettre en relief, l'effet de l'incorporation des fibres métalliques issues des pneus usés au sein d'une matrice en milieu agressif sur la durabilité du béton. Ça sera intéressant de mettre en contact directe le composite avec ce milieu.

- ❖ Dans le but de mettre en exergue, l'importance de l'incorporation des fibres sur le comportement du composite à la flexion, il sera recommandé de faire l'étude de celui-ci après la première fissuration.

- ❖ Une orientation préférentielle contribue à l'amélioration des résistances des bétons.

- ❖ L'utilisation des fibres comme renforts dans les bétons d'une part, et d'autre part pour la diminution du retrait, se présente comme une solution la plus adéquate à entreprendre dans les zones sahariennes, de ce fait on recommande la poursuite des recherches dans cet axe.

Références bibliographiques

- [1] **MIMOUNI M.** "Les renforts fibreux utilisés dans les matériaux de construction" Algérie équipement ; №15, Sept.1994.
- [2] **DREUX G., FESTA J.** "Nouveau guide du béton et ses constituants" Edition Eyrolles, Huitième Edition, Mai 1998.
- [3] **BEAUDOIN J. J.** "Béton renforcé de fibres" Institut de recherche en construction (IRC), Conseil National de Recherche, Canada, p. 04, 1982.
- [4] **MULLER F.** "Amiante, Notion essentielles", LAIMT 67, nov. 2003.
- [5] **BERTHOLET J.M.** "Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures" 3^{ème} Edition, 1999.
- [6] **BARON J. et OLLIVIER J. P.** "Les bétons bases et données pour leur formulation" Edition Eyrolles, 1996.
- [7] **CHAALAL O. :** "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, Sept-Oct.1995.
- [8] **FICHE TECHNIQUE CIMBETON AB4 :** "Les bétons spéciaux", Centre d'information de l'industrie cimentier – Paris, 1993.
- [9] **KRIKER A.** "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, 2005.
- [10] **HAOUARI H.** "Contribution à l'étude du comportement du béton renforce de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques", Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 1993.
- [11] **AIT AMEUR M.M.** "Contribution à l'étude expérimental des bétons renforces de fibres d'acier locales", Thèse de magister, université de Tiaret, Algérie, 1998.
- [12] **CHANVILLARD G.** "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 OA12, 1993.
- [13] **CASANOVA P.** "Béton renforcés de fibres métalliques du matériaux à la structure", Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Série ouvrages d'art OA20, France, Fev. 1996.

- [14] **JECIC P., ZANGHELINI F.** "Mortiers et ciments armés de fibres, étude bibliographique", Annales de l'I TBTB, N° 347, Fev. 1977.
- [15] **BOUAZZA A.** "Les sites de décharges : le rôle du géotechnicien", Algérie équipement, N° 10, Oct.1993.
- [16] **LANGUEDOC R.** "Guide pratique des déchets", (site Internet google.fr), 2001.
- [17] **LETTRE DE L'ECO-CONSOMMATION N°34** –question du mois novembre. 2002 (site Internet google.fr).
- [18] **CONSTANT E.** "Le problème du pneu usagé non rechapable P.U.N.R", (site Internet google.fr). Oct. 1997. – Mar. 1998.
- [19] **JOËL F.** "Rôle du pneumatique dans le phénomène d'adhérence", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC); N° 255, Avr - Mai –Juin. 2005.
- [20] **SANDRA B., ANACLET T., LOINS GRANJU J.** "Un composite cimentaire résistant à la fissuration : synergie « Granulats en caoutchouc – renfort par des fibres »", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC); N° 250-251, Mai-Juin-Juil-Aout.2004.
- [21] **ERIC F., STEPHANE F.** "Le béton de sable appliqué au chaussées routières", infrastructure, Montréal, Crein, Vol.9, N° 5, Juill-Août. 2002.
- [22] **Fiche technique cimbeton CB3** "les fibres pour bétons et mortiers", Centre d'information de l'industrie cimentière – Paris, 1993.
- [23] **PIERRE R.** "Les bétons de fibres métalliques", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France, 1998.
- [24] **BENMALEK. M. L** "contribution à l'étude des bétons de sables dunaires pour éléments de structures", Thèse de magister, Université de Constantine, Oct.1992.
- [25] **PRESSE DE L'ECOLE NATIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES** "Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation ", France, 1994.
- [26] **CHAOUACH A. A.** "Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes", Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique (ENP), juillet 1993.
- [27] **JEAN PAUL B., PIERRE B.** "Etude expérimentale de pieux en béton de sable forés à la tarière continue et armé après bétonnage", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 195, Jan-Fev.1995.

- [28] **CHAUVIN J.J., GRIMALDI G.** "Les bétons de sable", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 157, Sept.1988.
- [29] **C.E.B.T.P** "Synthèse de connaissance sur le béton de sable", Opération 52G119, LRPC de Bordeaux, Déc.1986.
- [30] **GOTTEICHA M.** "Caractérisation des béton de sable a base de copeaux de bois traites", Thèse de Magister, université de Laghaout, 2005.
- [31] **CHANVILLARD G., BASUYAUX O.** " Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 205, Sept-Oct.1996.
- [32] **BENAISSA A., MORLIER P., TRAM V.** "Le béton de sable un matériau non fissurant", Algérie équipement, Revue technique de l'école nationale des travaux publics, N° 06, Algérie, Oct.1992.
- [33] **ADAM M. N.** "Propriétés des bétons", Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles. Sep. 2000.
- [34] **FRANÇOIS DE LARRARD** "optimisation of high performances concrete, Micromechanic of concrète and cementitious composites", Press poly et univ, Romandes, Lausanne, 1993
- [34] **KHELAFI H.** "Les bétons de hautes performances bétons aux fumées de silice", Algérie équipement, N° 11, Janvier 1994
- [35] **BENAISSA A.** "Déformation différées d'un béton de sable", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, Nov 1992.
- [36] **BATATA A. et MEROUANI Z.** "Le béton de sable de dune: sa formulation et ses propriétés", Séminaire organisé par CNERIB, Biskra, Déc. 1991.
- [37] **ZERGUINI A., PIERRE R.** "Exemple d'étude expérimentale portant sur la formulation optimale d'un béton de fibres métalliques (BFM) pouer dalle", Bulletin des Laboratoire des Ponts et Chaussées, N° 235, Nov-Dec .2001.
- [38] **PIERRE R., HARROUCHE N., BELLOC A.** "Méthode de composition des bétons de fibres métalliques", Annales de L'I.T.B.T.P, N° 475, Juin – Juillet. 1989.
- [39] **SWAMY R.N., MANAGAT R.S.** "Influence of fiber geometries on the properties of steel fiber reinforced concrete", Cement and concrete research, Vol 4 N° 3, 1974.

- [40] **MOENS J.E.C.** "Steel fiber concrete mixt proportioning", A.C.I convention Philadelphie, Mars. 1976.
- [41] **DEHOUSSE N., LEJEUNE A., CUYENS T.** "Les mortiers et les bétons renforcés de fibres d'aciers", Bruxelles C.S.T.S revue 2, 1974.
- [42] **SWAMY R.N., MANAGAT P.S.** "Compatibility of steel fibre reinforced concrete", Ciment and concrete Research, Volume. №5, mai. 1974.
- [43] **EDINGTON L., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T.** "Steel fiber reinforced concrete", Building Research Establish, GB, (July 1974).
- [44] **LIM T.Y., PARAMSIVAM P., LEE S.L.** "Bending behaviour of steel fiber concrete beams", ACI, Structural journal, Nov-Dec.1987.
- [45] **VENUATM.** "Des fibres pour alléger et renforcer le béton", Cahier techniques du bâtiment, № 58, France, 1983.
- [46] **ELIE ABBSI** "Bétons de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au C.E.B.T.P ", Annales de L'I.T.B.T.P, № 520, Janvier 1994.
- [47] **PIERRE R., RENWEZ S., BELLOC A.** "Les bétons de fibres à ultra-hautes performances", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, № 196, mars-avr.1995.
- [48] **PIERRE R., CASANOVA P., RENWEZ S.** "Les bétons fibrés à hautes performances des matériaux d'avenir", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, № 197, mai-juin.1995.
- [49] **PIERRE R., HARROUCHE N., LE MAOU F.** "Comportement mécaniques des Bétons de fibres métalliques utilisés dans les structures en béton armé et précontraint", Annales de L'I.T.B.T.P , № 479, Série matériaux, Dec. 1989.
- [50] **AIT-TAHAR K.** "Etude expérimentale des poutres combinées en béton de fibres", Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Série bimestrielle № 3, Juin 2000.
- [51] **AIT-TAHAR K.** "Mode de rupture par flexion des poutres composites en béton de fibres", Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, Série bimestrielle № 4, Septembre 2001.
- [52] **DEBICKI G.** "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 du matériaux", Thèse de doctorat, Université de Lyon, 1988.
- [53] **MANAGAT P.S., AZZARI M.** "Shrinkage of steel fiber reinforced cement composite", Matériaux et construction, № 21, 1988.

-
- [54] **SWAMY R.N, ALTAANS** "Deformation and ultimate strenght in flexure of reinforced concrete beams made with steel fiber concrete", A.C.I journal, Sept-Oct 1981.
- [55] **DUPAIN. R, LANCHON. R, J. C. SAINT ARROMAN** "granulats, sols, ciments et bétons – caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire", Edition casteilla – 25, ruerouge-75005 Paris 1995.
- [56] **GORISSE F.** "Essai et contrôle des bétons" Edition Eyrolles, Paris 1978.
- [57] **FICHE DE QUALITE** "Ciment CPJ – CEM II / 32.5A", Conformément à la norme NA 442, Edition, 2000.
- [58] **KRIKER A.** "Durabilité du béton à base de laitier", Thèse de magister, ENP, Algérie, 1992.
- [59] **MICHEL C.** "Matériaux et composants gros oeuvre", Edition delagrave, 1997.
- [60] **GRANITEX NOUVEAU PRODUIT** "Adjuvant du béton", Oct. 1999.
- [61] **KEDJOUR N.E.** "Le laboratoire du béton", Edition OPU, Algérie, 2005.
- [62] **KEDJOUR N.E.** "Propriétés et pathologie du béton", Edition OPU, Algérie, 1993.
- [63] **REUNION D'INGENIEUR** "Matériau de construction", Edition Eyrolles, 1978.
- [64] **SWAMY R.N. et STAVRIDES. H.** "Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking", ACI Journal, March 1979.
- [65] **SOROKA I.** "Concrete in hot environments", Edition E et FN SPON, London.
- [66] **EL HACHEM M.** "Etude de l'influence de la fibre amorphe sur le retrait et fluage du béton", Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1990.

TABLE DES MATIERES

Résumés	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES FIBRES ET LES DECHETS INDUSTRIELS (PNEUS USES)

I.1. Introduction	1
I.2. Les différents catégories de fibres utilisées dans le renforcement des matériaux de constructions	2
I.2.1. Introduction	2
I.2.2. Les fibres de polypropylènes	2
I.2.3. Les fibres d'amiantes	3
I.2.4. Les fibres de carbone	4
I.2.5. Les fibres de verres	5
I.2.6. Les fibres végétales	8
I.2.7. Les fibres métalliques	9
I.2.8. Autres fibres	12
I.3. Déchets industriels	13
I.3.1. Introduction	13
I.3.2. Classification des déchets	13
I.3.2.1. Définition	13
a)- Les déchets organiques	14
b)- Les déchets inertes	14
c)- Les déchets banal	14
d)- Les déchets spéciaux	14
I.3.3. Généralité sur les pneus	14
I.3.4. Définition et caractéristiques physique des pneus	16
I.3.5. Les fonctions et la structure du pneumatiques	17
I.3.6. Valorisation et domaine d'application des pneumatiques	18
I.4. Conclusion	19

CHAPITRE II : BETONS DE SABLE ET BETONS RENFORCES PAR FIBRES METALLIQUES ET LEURS APPLICATIONS

II.1. Introduction	20
II.2. Historique des bétons de sable	21
II.3. Utilisation du béton de sable dans le monde	22
II.3.1. Béton de sable en CEI (communauté des états indépendants)	22
II.3.2. Béton de sable en France	23
II.3.3. Béton de sable en Golf d'Arabie	24
II.3.3. Béton de sable en Afrique du Nord	25

II.4. Composition et formulation des bétons de sable	25
II.4.1. Composition des bétons de sable	25
II.4.2. Formulation d'un béton de sable	29
II.5. Propriétés des bétons de sable	30
II.5.1. Compacité	30
II.5.2. Maniabilité	31
II.5.3. Propriétés mécaniques	32
II.5.4. Retrait	33
II.5.5. Fluage	35
II.5.6. Durabilité	36
II.6. Avantages et domaines d'application des bétons de sable	37
II.7. Bétons renforcés par des fibres métalliques	39
II.7.1. Historique des bétons de fibres métalliques	39
II.8. Composition et formulation des bétons de fibres métalliques	41
II.8.1. Compositions des bétons de fibres métalliques	41
II.8.2. Formulation des bétons de fibres métalliques	41
II.9. Maniabilité des bétons de fibres	44
II.9.1. Influence de la géométrie des fibres	44
II.9.2. Influence du dosage en fibres	45
II.9.3. Influence de la granulométrie du mélange	45
II.10. Fonctionnement de rupture des bétons de fibres	46
II.10.1. Fonctionnement mécanique des fibres métalliques dans les bétons	46
II.10.2. Mécanisme de rupture des bétons de fibres	46
II.11. Propriétés mécaniques des bétons de fibres métalliques	48
II.11.1. Comportement en compression du béton de fibres métalliques	48
II.11.2. Comportement en traction du béton de fibres métalliques	50
II.11.3. Comportement en flexion du béton de fibres métalliques	51
II.11.4. Comportement sous sollicitations impulsionnelles (chocs)	52
II.11.5. Influence de l'orientation des fibres	53
II.11.6. Retrait et fluage	54
II.11.7. Durabilité	56
II.11.8. Résistance au feu	57
II.12. Conclusion	58

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES COMPOSANTS ET FORMULATION DES BFM ETUDIES

III.1. Introduction	59
III.2. Caractéristiques des matériaux	59
III.2.1. Sable	59
III.2.1.1. Masse volumique absolue	60
III.2.1.2. Masse volumique apparente	61
III.2.1.3. Coefficient d'absorption d'eau	61
III.2.1.4. Equivalent de sable	62
III.2.1.5. Analyse granulométrique	63
III.2.2. Ciment	65
III.2.2.1. Surface spécifique	65

III.2.2.2. Temps de prise	66
III.2.2.3. Caractéristiques chimiques	66
III.2.2.4. Composition minéralogique du clinker	67
III.2.2.5. Indice d'hydraulicité	67
III.2.2.6. Caractéristiques mécaniques	68
III.2.3. Eau de gâchage	68
III.2.4. L'adjuvant	68
III.2.4.1. Généralité sur les adjuvants	68
III.2.4.2. Mise en œuvre des adjuvants	69
III.2.4.3. Caractéristiques de l'adjuvant utilisé	69
III.2.5. Les fibres	71
III.2.5.1. Caractéristiques des fibres métalliques issues de l'incinération des pneus usés	72
a)- Caractéristiques mécaniques de la fibre utilisée	72
III.3. Formulation des bétons de sables renforcés de fibres	76
III.3.1. Formulation d'un béton de sable témoin	76
III.3.1.1. Les essais de maniabilité	77
a)- Essai de l'étalement à la table à secousses	77
b) L'essai VÉBé	79
III.3.2. Formulation d'un béton de sables renforcés de fibres	80
III.4. Conclusion	82
 CHAPITRE IV : COMPORTEMENTS MECANQUES ET RHEOLOGIQUES DES BSFM ETUDIÉS 	
IV.1. Introduction	84
IV.2. Modalités d'essai de résistance mécanique	84
IV.2.1. Essai de rupture par flexion	85
IV.2.2. Essai de rupture par compression	85
IV.3. Essai de résistance mécanique sur BSFM	86
IV.3.1. Confection des éprouvettes et conditions de conservation	87
IV.3.2. Essai de traction par flexion	88
IV.3.2.1. Résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ 32.5)	88
a)- Discussion des résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CPJ 32.5)	89
IV.3.2.2. Résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CRS 42.5)	91
a)- Discussion des résultats de la résistance à la flexion du BSFM (CRS 42.5)	93
IV.3.3. Essai de compression	93
IV.3.3.1. Résultats de la résistance à la compression du BSFM (CPJ 32.5)	94
a) Discussion des résultats de la résistance à la compression du BSFM (CPJ 32.5)	95
IV.3.3.2. Résultats de la résistance à la compression du BSFM (CRS 42.5)	97
a)- Discussion des résultats de la résistance à la compression BSFM (CRS 42.5)	98

IV.4. Etude de l'influence des FM sur le retrait du béton de sable dans les conditions chaudes et sèches	99
IV.4.1. Introduction	99
IV.4.2. Les différents types de retrait	100
IV.4.2.1. Retrait libre	100
IV.4.2.2. Retrait endogène	100
IV.4.2.3. Retrait de dessiccation	100
IV.4.2.4. Gonflement	101
IV.4.2.5. Retrait de séchage	101
IV.4.3. Les facteurs influant sur l'amplitude du retrait	101
IV.4.3.1. Composition de béton	101
IV.4.3.2. Nature de ciment	102
IV.4.4. Variation dimensionnelle de béton de sable	102
IV.4.4.1. But de l'essai	102
IV.4.4.2. Essai de retrait libre	102
a)- Résultats du 1 ^{er} mode (éprouvettes conservées à l'air libre)	103
b)- Discussion du résultats 1 ^{er} mode	105
c)- Résultats du 2 ^{eme} mode (éprouvettes conservées à l'eau)	106
d)- Discussion des résultats 2 ^{eme} mode	107
IV.4.4.3. Résultats de la perte en poids	108
a)- Discussion des résultats	110
IV.5. Conclusion	111

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATION