

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Sebbane Housseem Eddine

Habbouchi Mohamed Salah

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

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Etude des propriétés physico-mécaniques des bétons renforcés par des
fibres.**

Devant le jury composé de :

ARIBI Chouaib

MAA

UAMOB

Président

HAMI Brahim

MCB

UAMOB

Encadreur

MAA

UAMOB

Examinateur

KENNOUCHE Salim

MCB

UAMOB

Examinateur

Année Universitaire 2018/2019

Dédicace :

Nous dédions ce modeste travail :

*À nos chers parents nous mères et nous pères pour leur
patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

À nos frères et nous sœurs.

À nous ami(e)s et collègues.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du
moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
travail soit possible.*

Merci !

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Ensuite, nous remercions nos parents qui nous ont soutenu beaucoup pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous remercions très sincèrement notre promoteur, Mr HAMI BRAHIM. Pour tout le savoir qu'il nous a apporté, et pour nous avoir encadré et dirigé au cours de notre projet de fin d'études.

Nous remercions les membres de jury, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et juger notre travail, a leurs exprimé toute notre gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail. Notre reconnaissance va aussi à l'ensemble du personnel des laboratoires LCTP de BOUIRA , qui ont permis par leur soutien et les ressources mises à notre disposition la réalisation de cette recherche, avec une attention particulière pour leur présence et leur précieuse assistance technique et les nombreuses explications qu'elles nous ont patiemment données.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

À tous ces intervenants, Nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Résumé

L'ajout d'un déchet (les fibres) dans les matériaux de construction, particulièrement, les bétons est une technique de plus en plus utilisée, pour plusieurs raisons, soit écologique, soit économique, soit pour améliorer certaines propriétés à l'état frais ou durci.

Les propriétés mécaniques du béton de fibres dépendent de plusieurs facteurs qui sont les conditions de mise en œuvre, le dosage, l'espacement, l'orientation et la distribution des fibres dans le béton.

Dans notre travail nous avons étudié le comportement du béton à base de fibres métalliques issues de l'unité de recyclage et qui se trouve à EL-HACHIMIA ainsi que les fibres de SIKA. Notre travail consiste à l'étude de l'influence des fibres métalliques de SIKA à différents pourcentages (0,5%, 1,5%, 2%) sur le comportement physico-mécanique (traction par flexion et compression) du béton en les comparants à un béton à base de déchet de fibres métalliques. Les résultats obtenus montrent que la résistance mécanique en flexion du béton renforcé par les déchets de fibres métalliques donne une résistance meilleure à celle du béton renforcé par les fibres métallique de SIKA.

Mots clés : bétons, fibres métalliques, déchet de fibre métallique (DFM), résistance mécanique.

Abstract

The addition of waste (fibers) in building materials, especially concrete, is a technique that is increasingly being used, for a number of reasons, either ecological or economical, or to improve certain properties in the fresh state or hardened.

The mechanical properties of fiber concrete depend on several factors which are the conditions of implementation, dosage, spacing, orientation and distribution of fibers in concrete.

In our work we studied the behavior of metal fiber concrete from the recycling unit at EL-HACHIMIA and the SIKA fibers. Our work consists in studying the influence of SIKA metal fibers at different percentages (0.5%, 1.5%, 2%) on the physico-mechanical behavior (bending and compression tensile) of concrete in compared to a concrete based on metal fiber waste.

The results obtained show that the bending strength of concrete reinforced with metal fiber waste gives a better resistance to that of SIKA reinforced metal fiber reinforced concrete.

Key words: concretes, metal fibers, metal fiber waste (DFM), mechanical strength.

ملخص

تعد إضافة النفايات (الألياف) في مواد البناء، خاصة الخرسانة، تقنية يتم استخدامها بشكل متزايد، لعدة أسباب، سواء كانت إكلولوجية او اقتصادية أو لتحسين خصائص معينة في الحالة الطازجة او الصلبة. تعتمد الخواص الميكانيكية للخرسانة المصنوعة من الألياف على عدة عوامل هي شروط التنفيذ و الجرعة و التباعد و التوجه و التباعد و توزيع الالياف في الخرسانة.

في عملنا درسنا سلوك خرسانة الالياف المعدنية من وحدة التدوير الموجودة في الهاشمية والياف SIKAL. يتكون عملنا في دراسة تأثير الالياف المعدنية بنسب مختلفة، (0.5 % ، 1.5 % ، 2 %) على السلوك الفيزيائي و الميكانيكي للانحناء (الانحناء وضغط الشد) في الخرسانة بالمقارنة مع الخرسانة القائمة على نفايات الالياف المعدنية. اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها ان قوة الانحناء للخرسانة المقواة بنفايات الالياف المعدنية تعطي مقاومة افضل من الخرسانة المقواة بالياف المعدنية لSIKAL.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة، الالياف المعدنية، نفايات الالياف المعدنية ، القوة الميكانيكية.

Sommaire

Introduction Générale	1
I.1. Le béton	3
I.2. Constituants du béton	3
I.2.1.Ciment	3
I.2.2.Composition chimique et minéralogique du ciment	4
I.2.2.1 Le clinker (K)	4
I.2.3. Types de ciments	5
I.2.4.Types de ciments selon classe de résistance :	5
I.2.5.Dosage de ciment.....	6
I.3.Granulats.....	6
I.3.1. Classification des granulats	7
I.3.2. Type des Granulats	8
I.3.3. Les Sables	8
I.4. Eau de gâchage.....	9
I.5. Adjuvants	10
I.6. Types de béton	10
I.7. Comportement mécanique	13
I.7.1. Résistance à la compression	13
I.7.2. Résistance à la traction.....	13
I.8. Comportement chimique	14
I.9. Conclusion	14
II.1. Introduction	16
II.2. Définition de béton de fibres	16
II.3. Les fibres	17
II.3.1. Définition des fibres	17
II.3.2. Différents types de fibres	17
II.3.2.1. Fibres naturelles	17
II.3.2.2. Fibres synthétiques	17
II.3.2.3. Fibres artificielles.....	18
II.3.2.4. Fibres de polypropylène	18
II.3.2.5. Fibres de verre.....	18
II.3.2.6. Fibres métalliques	19
II.3.3. Critère de choix du type de fibres.....	19

II.4. Déchet.....	21
II.4.1. Origine de la production des déchets.....	21
II.4.2 Constitution chimique des déchets	22
II.4.3. Valorisation des déchets	22
II.4.3.1. Les déchets pneumatiques	22
II.4. Rôle des fibres dans le béton	23
II.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres	24
II.6. Mécanismes de fonctionnement des fibres	25
II.7. Domaine d'applications des bétons de fibres	25
II.8. Orientations et distributions des fibres.....	26
II.9. Avantages du béton fibré.....	27
II.10. Conclusion	27
III.1. Introduction	28
III.2. Définition des bétons fibrés.....	28
III.3. Les travaux réalisés sur les Bétons de fibres	29
III.3.1. Etude de Bensaid BOULEKBACHE et All.....	29
III.3.1.1. Matériaux et matériel utilisés	29
III.3.1.2. Résultats et discussions	30
III.4. Conclusions	33
III.2. Etude de Ali ELLOUZE et All.....	33
III.2.1. Introduction.....	34
III.2.3. Formulation.....	34
III.2.4. Recherche du pourcentage optimal de superplastifiant	34
III.2.5. Effet des fibres sur la maniabilité.....	35
III.2.6. Effet des fibres sur la résistance.....	36
III.2.7. Effet des fibres sur la fissuration, la ductilité et la déformation	37
III.2.8. Comportement en compression.....	38
III.2.9. Conclusion	39
III.3. Etude de Bensaid BOULEKBACHE et All	39
III.3.1. Introduction.....	39
III.3.2. Influence de l'orientation des fibres sur en compression et en flexion	40
III.3.2.1. Comportement en compression	40
III.3.2.2. Comportement en flexion.....	40
III.3.3. Conclusion	41
III.3.4. Conclusion	42

IV.1. Introduction	43
IV.2. Caractéristiques des matériaux	43
IV.2.1. Le ciment	43
IV.2.1.1. Caractérisation du ciment.....	43
IV.2.1.2. Essais sur la pâte de ciment à l'état frais	44
IV.2.2. Essais sur les granulats	46
IV.2.2.1. Le sable	46
IV.2.2.2. Le Gravier	50
IV.2.2.3. Superplastifiant SIKA viscocrete	51
IV.2.2.4. Les fibres métalliques	52
IV.2.2.5. Les déchet de fibre métalliques	52
III.2.2.6. L'eau de gâchage	53
IV.3. Méthodes d'élaboration	53
IV.3.1. Formulation des bétons	53
IV.3.2. formulation et préparation des bétons	53
IV.3.4. Composition des bétons formulés	54
IV.3.4.1. La formulation du béton utilisé au laboratoire	54
IV.3.4.2. Malaxage du béton.....	55
IV.3.4.3. Préparation des moules	56
IV.3.5. Conservation des éprouvettes	56
IV.3.6. Méthodes de caractérisation	57
IV.3.6.1. Essai à l'état frais.....	57
IV.3.6.2.Essais à l'état durci	58
IV.4. Conclusion	
V. Résultats et discussions.....	60
V.1. Le ciment.....	60
V.1.1. Début et fin de prise	60
V.2. Les Granulats	60
V.2.1. Le sable	60
V.2.1.1. Analyse Granulométrique du sable	60
V.2.1.2. Equivalent de sable	61
V.2.2.2. Essai de Los Angeles	63
V.2.2.3. Masse Volumique des Granulats	64
V.3. Essai sur béton à l'état frais.....	64
V.3.1. Essai d'Affaissement au cône d'Abrams	64

V.4. Essai sur béton à l'état durci.....	65
V.4.1. Masse volumique durcie des bétons	65
V.4.1 Essai de Compression.....	66
V.4.1.1 Essai de Compression Pour 0.5% de Fibre.....	66
V.4.1.2 Essai de Compression Pour 1% de Fibre	68
V.4.1.1 Essai de Compression Pour 2% de Fibre	69
V.4.2 Essai de Flexion	71
V.4.2.1 Essai de Flexion Pour 0.5% de Fibre	71
V.4.2.1 Essai de Flexion Pour 1% de Fibre	72
V.4.2.3 Essai de Flexion Pour 2% de Fibre	74
V.5. Conclusion.....	75
Conclusion Générale	76

Liste des figures

Figure I.1. Constituants de Béton.	3
Figure I.2. Différents types de Granulats.	6
Figure I.3. Série des Tamis en mm7	7
Figure II.4. Les fibres de polypropylène.18	18
Figure II.5. Les fibres de verre.18	18
Figure II.6. Les fibres métalliques.19	19
Figure II.7. Différentes formes géométriques de fibres métalliques.21	21
Figure II.8. Rôle de fibre dans le béton 1.23	23
Figure II.9. Rôle de fibre dans le béton 2.23	23
Figure III.10. Formulation et caractéristiques rhéologiques des bétons testés31	31
Figure III.11. Charges de 1ère fissuration et ultimes des différentes configurations32	32
Figure III.12. Evolution de l'affaissement et de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour un rapport G/S = 1,2.35	35
Figure III.13. Évolution de l'affaissement et du temps d'écoulement en36	36
Figure III.14. Évolution de la contrainte de flexion en fonction de la flèche.37	37
Figure 15. Évolution de la contrainte de compression en fonction du raccourcissement.38	38
Figure III.16. Effet des fibres sur le comportement en compression selon le type de béton.40	40
Figure III.17. Distribution et orientation des fibres à travers la section de rupture.41	41
Figure IV.18. Diagramme circulaire de la composition chimique du ciment.44	44
Figure IV.19. Essai de prise45	45
Figure IV.20. Série de tamis.47	47
Figure IV. 21. Principe de l'essai d'équivalente de sable.48	48
Figure IV.22. Essai d'équivalent de sable.49	49
Figure IV.23 Détermination des masses volumiques absolue des granulats.51	51
Figure IV.24. Malaxeur du béton55	55
Figure IV.25. Eprouvettes de Béton coulé dans les moules.56	56
Figure IV.26. Essai d'Affaissement au cône d'Abrams57	57
Figure IV.27. Coulage du béton.57	57
Figure IV.28. Essai de traction58	58
Figure IV.29. Appareille de l'essai de traction.59	59
Figure IV.30. Appareille de l'essai de compression.59	59
Figure V.31. Temps de fin et début de prise de ciment CEM II 42.560	60
Figure V.32. Courbe granulométrique des granulats utilisés.63	63
Figure V.33. L'affaissement des Béton dosé par le DFM.65	65
Figure V.34. Masses volumiques des bétons à l'état durci.66	66
Figure V.35. Variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 0.5 % de fibre67	67
Figure V.36. Variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 1 % de fibre68	68
Figure V.37. Variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 2 % de fibre70	70
Figure V.38. Béton renforcé par les déchets de fibres métalliques70	70
Figure V.39. Béton renforcé les fibre métallique de SIKA70	70
Figure V. 40. Fibre métallique de SIKA71	71
Figure V. 41. Déchet de Fibre Métallique71	71
Figure V. 42. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 0.5 % de fibre.72	72
Figure V. 43. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 1 % de fibre73	73
Figure V.44. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 2 % de fibre.74	74
Figure V.45. Béton renforcé par les déchets de fibres métalliques75	75
Figure V.46. Béton renforcé par les fibres métallique de SIKA.75	75

Liste des tableaux

Tableau I.1. Classe de résistance de ciment.	6
Tableau II.2. Composition des pneus tourisme et poids lourd	22
Tableau II.3. Principales caractéristiques physiques et mécaniques	24
Tableau II.4. Domaines d'application des bétons fibres	26
Tableau III.5. Formulation et caractéristiques rhéologiques des bétons testés	30
Tableau III.6. Composition du béton témoin (pour un m ³).....	35
Tableau III.7. Résultats des essais de compression et de traction (par fendage) (MPa).....	36
Tableau III.8. Résultats des essais de compression et le module de Young des BFM.	38
Tableau III.9. Paramètres de la résistance de flexion.....	41
Tableau IV.10. Composition chimique ciment CEM II/A 42.5	43
Tableau IV.11. Caractéristiques minéralogiques de ciment.....	44
Tableau IV.12. Dimension nominales des tamis selon la norme NF P 18-560.....	46
Tableau IV.13. Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.....	49
Tableau IV.14. Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés.	54
Tableau IV.15. Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés	54
Tableau IV.16. Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés.	55
Tableau IV.17. Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés.	55
Tableau V.18. Résultats d'essai de début eu fin de prise du ciment.	60
Tableau V.19. Résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/3.	61
Tableau V.20. Les résultats d'essai d'équivalente de sable.	61
Tableau V.21. Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.	62
Tableau V.22. Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.	62
Tableau V.23. Résultats de l'essai de Los Angeles des graviers étudié.....	63
Tableau V.24. Résultats des masses volumiques absolues des Granulats.....	64
Tableau V.25. Résultats d'Affaissements des différents types de bétons.....	64
Tableau V.26. Résultats des masses volumiques des bétons à l'état durci.	65
Tableau V.27. Résultats de l'essai de compression pour 0.5% de Fibre Métallique	66
Tableau V.28. Résultats de l'essai de compression pour 0.5% de Déchet Fibre Métallique	67
Tableau V.29. Résultats de l'essai de compression pour 1% de Fibre Métallique	68
Tableau V.30. Résultats de l'essai de compression pour 1 % de Déchet Fibre Métallique	68
Tableau V.31. Résultats de l'essai de compression pour 2% de Fibre Métallique	69
Tableau V.32. Résultats de l'essai de compression pour 2% de déchet Fibre Métallique	69
Tableau V. 33. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 0.5 % de Fibre Métallique	71
Tableau V. 34. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 0.5 % de déchet Fibre Métallique	71
Tableau V.35. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 1 % de Fibre Métallique.....	72
Tableau V. 36. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 1 % de déchet Fibre Métallique....	73
Tableau V.37. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 2 % de Fibre Métallique.....	74
Tableau V. 38. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 2 % de déchet Fibre Métallique....	74

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc [01].

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BF) et les bétons de poudres réactives (BPR) [01].

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton et elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les fibres présentent des caractéristiques géométriques et mécaniques intéressantes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques [02]. Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de "couture" des fissures. En effet, la longueur maximale d'une microfissure et de l'ordre de la dimension de plus gros granulat. La longueur moyenne des fibres utilisées est nettement supérieure à la dimension de plus gros granulat. Chaque microfissure se propageant dans la pâte, peut être « pontée » par une ou plusieurs fibres. [02].

L'objectif de notre travail est de faire une étude comparative sur des Béton à base de différents types de fibres telles que : les fibres Métallique et les déchets Métallique sous forme de fibres dont les pourcentages sont de 0,5% ; 1% ; et 2% pour chaque type de fibre afin de connaître l'influence du taux de fibre commerciale ou sous forme de déchets sur les propriétés physico-mécanique des bétons fibrés.

Pour cela on a divisé ce travail en deux parties ; une partie théorique et une partie expérimentale.

- La première partie, est une étude bibliographique qui est divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre s'intitule généralités sur les bétons, le deuxième chapitre, est une étude bibliographique sur les bétons fibrés et dans le troisième chapitre nous présentons les différents types de fibres et leurs caractéristiques physiques et mécaniques, ainsi qu'un aperçu sur les déchets.

- La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la caractérisation des matériaux utilisés (Granulats, sable, ciment, adjuvants et les fibres) entrant dans la formulation du béton de Fibre, les méthodes de formulation, ainsi que les essais réalisés dans le cadre de cette étude.

Le dernier chapitre présente les différents résultats obtenus dans le cadre de cette étude. On terminera ce travail par une conclusion.

Chapitre I

Généralités sur les bétons

I.1. Le béton

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physicochimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats, et de la pâte de ciment (ciment, d'eau de gâchage et adjuvants) pour améliorer ou acquérir certaines propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle important dans le mélange.

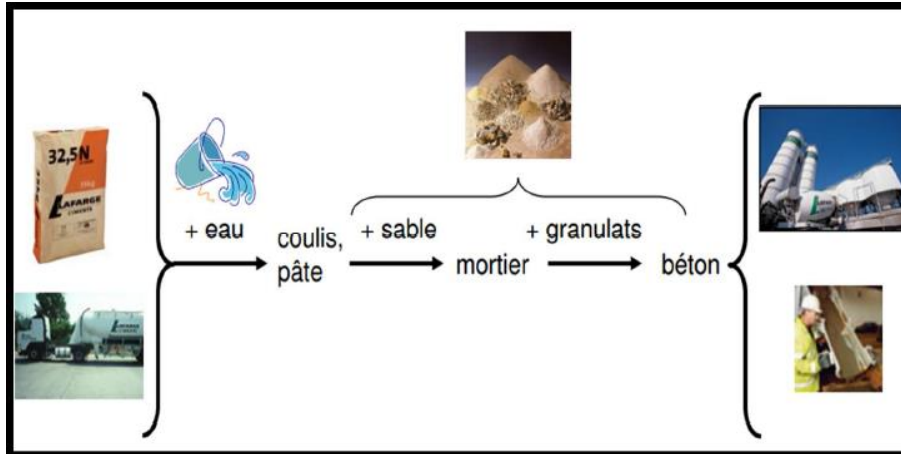


Figure I.1. Constituants de Béton.

I.2. Constituants du béton

I.2.1. Ciment

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudre minérale. On l'emploie en effet pour fabriquer le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde. La raison en est son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa disponibilité pratiquement universelle. Il suffit, en effet, de mélanger un peu de poudre avec de l'eau, du sable et des graviers pour obtenir, à température ambiante et en quelques heures, un matériau dur. [03]

Le ciment ordinaire anhydre est constitué de clinker Portland, de gypse et éventuellement d'additions telles que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau, la fumée de silice, pouzzolanes naturelles... [04]

En chimie des ciments, on a l'habitude d'utiliser une nomenclature particulière pour écrire les transformations chimiques ; celle-ci utilise l'initiale des oxydes en place des symboles chimiques classiques :



Ainsi les principaux constituants du ciment Portland s'écrivent :

- Silicate tricalcique, Ca_3SiO_5 ou $3\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_3\text{S}$;
- Silicate dicalcique, Ca_2SiO_4 ou $2\text{CaO}, \text{SiO}_2 : \text{C}_2\text{S}$;
- Aluminate tricalcique, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}_3\text{A}$;
- Alumino ferrite Tetra calcique, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}\text{Fe}_2$ ou $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{C}_4\text{AF}$ [03].

I.2.2. Composition chimique et minéralogique du ciment

Les liants sont constitués par un mélange en proportions convenables de corps suivants :

Oxyde de calcium CaO

Silice SiO₂

Alumine Al₂O₃

Oxyde ferrique Fe₂O₃

Magnésie MgO

Anhydride sulfurique SO₃

Sulfate de calcium CaSO₄

I.2.2.1 Le clinker (K)

Le clinker, commun à tous les ciments courants, est un mélange de 95% de calcaire (calcaire, craie) et de 20% d'éléments secondaires. Le clinker est composé de 4 phases cristallines principales :

- **C₃S ou l'alite** : silicate tricalcique de composition chimique 3CaO.SiO₂ qui donne de la résistance mécanique au matériau au jeune âge. L'alite constitue entre 60% et 65% du clinker. L'hydratation du silicate tricalcique est une réaction exothermique conduisant à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par **l'équation (1) : $2C_3S + 7H \rightarrow C_3S_2H_4 + 3CH$ (1)**

A l'inverse de la composition de l'hydroxyde de calcium (CH ou Portlandite) qui est un composé cristallin bien défini, la composition des silicates de calcium n'est pas bien définie et est généralement notée C-S-H. L'alite est le principal composé du clinker et les hydrates formés lors de sa réaction avec l'eau de gâchage sont à la fois impliqués dans la résistance à court et moyen termes du matériau.

- **C₂S ou la bélite** : silicate bicalcique de composition chimique 2CaO.SiO₂ qui permet au matériau d'atteindre des résistances mécaniques plus importantes à moyen et long termes. La bélite constitue entre 5% et 20% du clinker. L'hydratation du silicate bicalcique est également une réaction exothermique qui conduit à la formation de silicate de calcium hydraté et d'hydroxyde de calcium. Elle se résume par **L'équation (2) : $2C_2S + 5H \rightarrow C_3S_2H_4 + CH$ (2).**

La formation des hydrates est beaucoup plus lente que celle issue de la réaction de l'alite avec l'eau de gâchage, ces hydrates permettent d'assurer la résistance à long terme

- **C₃A ou la célite** : aluminat tricalcique de composition chimique 3CaO.Al₂O₃ qui participe principalement au phénomène de prise des bétons mais qui ne présente que de faibles résistances mécaniques et chimiques. La célite constitue entre 4% et 12% du clinker. Le processus d'hydratation de l'aluminat tricalcique se déroule en deux temps.

Tout d'abord, en présence de sulfate, l'hydratation de C₃A engendre la formation d'ettringite, l'équation (3) : $C_3A + 3CSH_2 + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ (3). Ensuite, quand la teneur en sulfate diminue, l'ettringite réagit avec le reste de célite pour former du mono-sulfo-aluminate hydraté, l'équation (4) : $C_6AS_3H_{32} + 2C_3A + 4H \rightarrow 3C_4ASH_{12}$ (4). De part sa forte réactivité avec l'eau de gâchage, la célite a un rôle majeur dans la rhéologie de la pâte et la résistance à court terme du matériau.

- **C₄AF ou la ferrite** : alumino-ferrite tétracalcique de composition chimique $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$. Le C₄AF constitue entre 1% et 5% du clinker.

I.2.3. Types de ciments

La gamme des ciments courant permet de choisir un ciment en fonction de la résistance visée pour le béton, de l'environnement de l'ouvrage, de la saison de la construction, ainsi que du type d'ouvrage à construire.

Classification des ciments selon la composition chimique [5] :

- **Les ciments Portland Artificiel (CPA – CEM I)**, qui contient au moins 95 % de clinker. Le pourcentage restant est appelé constituant secondaire.
- **Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)**, dont la teneur en addition minérale est de 6 à 20 % pour la sous-catégorie A, et de 21 à 35 % pour la sous-catégorie B.
- **Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)**, dont la teneur en laitier respective est comprise dans les intervalles suivants : [36, 65 %], [66, 80 %], [81, 95 %].
- **Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)**, qui contiennent des pouzzolanes à hauteur de 10 à 35 % pour la catégorie A, et 36 à 55 % pour la catégorie B.
- **Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)**, comprenant un mélange des deux types d'additions dans des proportions de 18 à 30 %, ou de 31 à 50 %, respectivement. Ces différents ciments sont caractérisés par les différents éléments qui entrent dans leur composition.

I.2.4. Types de ciments selon classe de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance, 32,5 - 42,5 - 52,5, définies par la valeur minimale de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa (1 MPa = 1 N/mm² = 10 bars). Pour les ciments de classes 32,5 et 42,5, il est fixé une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours, comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau I.1. Classe de résistance de ciment.

Résistance à la compression (en MPa)				
Désignation de la classe de résistance	Résistance à court terme		Résistance courante	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 L	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 N	–	≥ 16,0		
32,5 R	≥ 10	–		
42,5 L	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 N	≥ 10	–		
42,5 R	≥ 20	–		
52,5 L	≥ 10	–	≥ 52,5	–
52,5 N	≥ 20	–		
52,5 R	≥ 30	–		

I.2.5. Dosage de ciment

Le dosage en ciment des ouvrages varie en général de 200 à 300 Kg par m³ de béton en œuvre est de 300 à 400 kg/m³ pour le béton armé ; un dosage de 350 kg/m³ est considéré comme un minimum pour les ouvrages en béton précontraint. En fait, pour des limites de 200 à 500 kg/m³, les résistances sont sensiblement Proportionnelles aux dosages [5].

I.3. Granulats

Les granulats sont les constituants essentiels des bétons, qui conditionnent à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme étant un ensemble de grains minéraux destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées des assises et des ballasts de voies ferrées.[01]



Figure I.2. Différents types de Granulats.

I.3.1. Classification des granulats

Les granulats sont classés en fonction de leur grosseur déterminée sur les tamis à mailles carrées dont la dimension inférieure est exprimée en millimètre. On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis. Le terme « Granulats d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de « d » pour le petit élément à « D » pour les gros éléments. La norme P18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

- les fillers ou fines 0/D (D < 2mm et 70% < 0,063mm),
- les sablons 0/D (D < 1mm et 70% < 0,063mm),
- les sables 0/D (1mm < D < 6,3mm),
- les graves 0/D (D > 6,3mm),
- les gravillons d/D (d > 1mm et D < 125mm).
- ballast d/D (d > 25 mm et D < 50mm).

Avec ; D: dimension supérieure du granulat et d: dimension inférieure du granulat.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0.063 – 0.08 – 0.10 – **0.125** – 0.16 – 0.2 – **0.25** – 0.315 – 0.4 – **0.5** – 0.63 – 0.8 – **1** – 1.25 – 1.6 – **2** – 3.15 – **4** – 5 – 6.3 – **8** – 10 – 12.5 – 14 – **16** – 20 – 25 – **31.5** – 40 – 50 – **63** – 80 – 100 – **125**.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées en gras correspondent à la série de base préconisée par le CEN (NF EN 933-2) ; de ce fait. Lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe. [06]



Figure I.3. Série des Tamis en mm

I.3.2. Type des Granulats

➤ Granulats naturels

D'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. Les granulats de roche meuble, dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion.

Les granulats de roche massive sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes anguleuses.

➤ Granulats artificiels

D'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

➤ Granulats recyclés

Obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.[05]

I.3.3. Les Sables

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation de matériaux d'origine minérale (essentiellement des roches) ou organique (coquilles, squelettes de coraux...) dont la dimension est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier) Les sables utilisés pour le béton sont soit d'origine naturelle, soit artificielles.[07]

➤ Les sables naturels

➤ Sable de mer

Ce sable est généralement, pur est excellent s'il n'est pas trop fin, le sable de mer, que l'on trouve à l'embouchure des rivières est en générale inutilisable car il est souvent mélangé avec la vase. Toutefois, le sable de mer est chargé en sel ; ceci est sans inconvénient pour tous les travaux à la mer et les fondations, mais il faut prendre des précautions pour les ouvrages en élévation, car les murs auraient tendance à rester humides. Si l'on est obligé d'utiliser le sable de mer dans ce cas, il est nécessaire de le laver au préalable à l'eau douce et purifié

➤ Sable d'oued ou de rivière

Il est extrait par curage du lit des cours d'eau, on choisit pour effectuer ces curages, les endroits donnant des matériaux siliceux. Toutefois, certaines régions, le sable de rivière est schisteux et donne de moins de bons résultats, surtout si le schiste est tendre car il a en outre, tendance à se transformer en argile. En fin, le sable de rivière gypseux est à éliminer.

➤ Le sable de dune

C'est une variété de sable de mer. Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très réguliers et très fins.

➤ **Le sable de carrière**

Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable et les empêchent d'adhérer au liants, il est donc à utiliser avec précaution. Les sables quartzeux sans matières terreuses ou argileuses, sont excellents pour les maçonneries.

➤ **Les sables artificiels**

Il provient, soit de transformation thermique des roches (après cuisson), minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers. On les obtient par broyage de roches dures (calcaires durs, grés, quartzites, laves). Ces matériaux sont intéressants, tant pour la confection de béton, que pour la confection de matériaux enrobés pour chaussées. Il convient toutefois de maîtriser le pourcentage de fines. Parmi les variétés des sables artificiels, on distingue :

➤ **Le sable de tuiles ou de briques**

On fabrique un excellent sable, a propriétés pouzzolaniques, en broyant des déchets de briques ou de tuiles.

➤ **Le sable de laitier de haut fourneau concassé**

Certains granulats artificiels ont des qualités remarquables de résistance et de granulométrie, c'est le cas de ce sable, très utilisé dans les régions de l'est de France, également dans le reste du pays pour la confection d'assises de chaussée stabilisées.

I.4. Eau de gâchage

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton, ou bien l'influence qu'il a sur la propriété du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).[02]

L'eau de gâchage est un ingrédient essentiel du béton et joue deux fonctions principales Confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité, la perméabilité, la résistance mécanique, la durabilité, la microstructure du béton et la cinétique d'hydratation du ciment.[05]

Pour convenir a la confection de béton, les eaux ne doivent contenir ni composée risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles.

Selon la norme P 18-303, les catégories des eaux susceptibles de souvenir a la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables
- Les eaux de recyclage provenant du rinçage des bétonnières ou camions malaxeurs
- Les eaux de pluie et de ruissellement

A coté, les catégories d'eaux ne devant pas être utilisées comprennent :

- Les eaux usées ;
- Les eaux vannes ou contenant des détergents ;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organique ou chimiques [06]

I.5. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Ils fournissent à la formulation de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles.

Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau, dont la synthèse, réalisée par une opération complexe de polymérisation, produit de longues chaînes de molécules de masses molaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent, suivant leur nature, à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [1].

Différents adjuvants peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques du béton :

- Accélérateurs de prise
- Plastifiants
- Super plastifiants
- Retardateurs de prise
- Entraîneurs d'air

I.6. Types de béton

Avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en constante **évolution**. Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des **performances recherchées**. En répondant aux normes de sécurité et s'adaptant aux envies des hommes, le béton, sous ses différentes formes, répond à nos besoins [10].

• Les Bétons Prêts à l'Emploi

Les "Bétons Prêts à l'Emploi", abrégés en BPE, sont des bétons conçus et produits industriellement dans une centrale à béton. Le béton est livré frais sur le chantier dans des camions-toupies. Il est prêt à être mis en œuvre soit directement avec la goulotte du camion-toupie, soit à l'aide d'un tapis ou d'une pompe à béton

• Le béton armé

Le béton armé est un matériau composite qui allie les propriétés mécaniques du béton et celles de l'acier (alliage de fer et carbone en faible pourcentage).

La résistance en traction du béton étant assez mauvaise, on ajoute des armatures en acier qui viennent renforcer le béton. L'acier ayant une bonne résistance tant en traction qu'en compression, il compense les faiblesses du béton et retarde ainsi l'ouverture des microfissures qui apparaissent lorsque le béton ne résiste plus à la traction.

- **Le béton précontraint**

Techniques qui consistent à tendre (comme des ressorts) les aciers constituant les armatures du béton, et donc à comprimer, au repos, ce dernier.

Dans la pré-tension (le plus souvent utilisée en bâtiment), les armatures sont mises en tension avant la prise du béton. Elles sont ensuite relâchées, mettant ainsi le béton en compression par simple effet d'adhérence. Cette technique ne permet pas d'atteindre des valeurs de précontrainte aussi élevées qu'en post-tension.

La post-tension consiste à disposer des câbles de précontrainte dans des gaines incorporées au béton. Après la prise du béton, les câbles sont tendus au moyen de vérins de manière à comprimer l'ouvrage au repos. Cette technique, relativement complexe, est généralement réservée aux grands ouvrages (comme les ponts) puisqu'elle nécessite la mise en œuvre d'encombrantes « pièces d'about » (dispositifs mis en place de part et d'autre de l'ouvrage et permettant la mise en tension des câbles).

- **Bétons de Hautes Performances**

Les BHP sont des bétons dits de hautes performances car ils possèdent de meilleures caractéristiques que les bétons normaux tels que :

- ❖ Une meilleure résistance à la compression, ce qui permet une réduction des quantités de béton nécessaires.
- ❖ Une grande fluidité (due aux super-plastifiants) ce qui permet une meilleure mise en œuvre, un meilleur pompage et ne nécessite pas de vibrer le béton pour obtenir une surface lisse.
- ❖ Des besoins en eau plus faible.

De plus les BHP ont une plus grande durabilité qui résulte de leur forte compacité et de leur très faible porosité ce qui diminue la quantité d'agents agressifs pénétrant dans le béton et donc protège les armatures de la corrosion et augmente la résistance des bétons au cycle gel/dégel.

- **Le béton projeté**

Le béton projeté est un béton qui est projeté à grande vitesse sur une surface au moyen d'air comprimé.

La force de l'impact sur la surface compacte le matériau ce qui l'empêche de s'affaisser ou de couler. Le béton projeté a des propriétés similaires à celles d'un béton ordinaire de composition similaire et mis en place de façon usuelle si ce n'est en fait qu'une méthode de mise en place différente.

Cette méthode permet d'éviter l'utilisation des coffrages, elle ne nécessite qu'une seule surface de support et peut être utilisée sur des surface courbes et irrégulières. Il existe deux procédés pour faire du béton projeté, le procédé par voie sèche et celui par voie humide :

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est-à-dire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance. L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la sortie de la lance. Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux, Car le béton étant sec dans la lance il ne risque pas de se solidifier. Des résistances élevées peuvent être facilement obtenues avec ce procédé puisqu'il permet d'atteindre de faibles rapports eau/liant. Le désavantage du procédé sec est que le dosage de l'eau dans le mélange se fait directement à la lance, par le lancier, ce qui complique le contrôle de la qualité.

- ❖ Le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimée ajoutée à la lance. Le procédé par voie humide est surtout utilisé lorsque les volumes à produire sont importants. Le contrôle de la qualité est plus simple avec ce procédé, puisqu'en utilisant un béton conventionnel, le dosage des constituants du mélange est connu.

- **Bétons auto plaçant et auto-nivelant**

Ce sont des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en œuvre sans vibration dans le coffrage, ils se mettent en place sans serrage.

Ils se caractérisent par leur grande capacité d'écoulement sans altération de la stabilité, leur pompabilité et leur long maintien de la fluidité. Ils se distinguent des bétons courants principalement par leurs propriétés à l'état frais, compromis entre fluidité, résistance à la ségrégation. Ils présentent à l'état durci des performances analogues à celles des bétons traditionnels mis en œuvre par vibration.

- **Les bétons légers**

L'intérêt des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage. Les bétons légers présentent des masses volumiques qui vont de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique.

Cette qualité est également recherchée dans les bétons isolants thermiques, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (argile expansée, polystyrène expansé, liège). On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire [05].

- **Les Bétons de fibres**

On appelle béton de fibre, un béton dans lequel on a incorporé une armature par inclusion direct de fibres isolées au moment du gâchage ou de la projection. Les fibres sont assimilables à un granulats spécial de forme très allongée et de forte résistance à la traction, susceptible d'améliorer légèrement la résistance à la traction du matériau et de ralentir la propagation des fissures. En pontant les fissures, les fibres améliorent le comportement post fissuration de la matrice en maintenant une forte portance pendant l'accroissement des déformations [14].

I.7. Comportement mécanique

I.7.1. Résistance à la compression

Le béton seul est un matériau naturellement résistant à la compression, d'autant plus s'il est armé, c'est donc sous ce type de charge qu'on essayera de le soumettre au maximum plutôt qu'à la traction. C'est pour cette raison que le béton n'est que très rarement utilisé seul, mais qu'il est plus souvent armé avec des barres en acier qui, elles, vont reprendre les efforts de traction. Peu importe le béton que vous choisirez, il sera donc particulièrement adapté pour construire des éléments soumis à la compression.

La classe de résistance du béton nous donne directement sa résistance à la compression, en effet la classe de résistance du béton est notée C X/Y où X représente la résistance à 28 jours d'une éprouvette cylindrique béton alors que Y représente la résistance à 28 jours d'une éprouvette rectangulaire. Ces valeurs normées seront donc des plus utiles pour choisir votre béton en fonction des charges qu'il devra supporter. Les bétons classiquement utilisés sur les chantiers ou pour votre maison sont des C25/30 ou C30/37 alors que les classes de résistance supérieure sont réservées à des constructions de beaucoup plus grande ampleur [11].

I.7.2. Résistance à la traction

Quand on évoque béton et traction ensemble, c'est généralement pour parler d'un accident de construction plutôt que pour évoquer les grandes capacités du béton à reprendre ces types d'efforts. En effet, la traction n'est vraiment pas le domaine d'application favori du béton. S'il n'est pas armé, le béton peut être même cassant comme du verre lorsqu'il est soumis à de la traction. C'est une des raisons pour laquelle le béton armé a été développé.

L'acier étant très résistant à la traction, c'est pour cette raison que Joseph Louis Lambot a décidé d'associer ces deux matériaux en vue de récupérer leurs deux caractéristiques principales et ainsi d'obtenir le matériau parfait. [12]

L'utilisation de béton seul pour résister à des efforts de traction est donc impossible, car les méthodes de calcul du BAEL ou même des Euro code négligent complètement la résistance à la traction du béton pour des problèmes de sécurité.

Il faudra donc faire bien attention lors de la conception de vos constructions à ce qu'un minimum d'éléments en béton (comme des suspentes) soit en traction et surtout à bien dimensionner les armatures en acier qui vont reprendre ces efforts. Plus vous aurez de tractions, plus vous devrez ferrailler vos éléments et plus le prix de votre construction sera élevé [11].

I.8. Comportement chimique

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques [04].

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles.[04].

La durabilité est tout aussi importante que les caractéristiques mécaniques pour le matériau béton. Cette propriété est définie (dans un cadre très général) par la capacité du matériau à maintenir ses caractéristiques physiques et performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisantes pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de services existantes et de l'environnement dans lequel il évolue. Le paramètre régissant la durabilité est bien entendu la perméabilité. Plus cette dernière est réduite et mieux sa durabilité en sera augmentée.[04].

Pour évaluer la durabilité « potentielle » d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et la résistance du matériau vis-à-vis de ces dégradations.[04].

I.9. Conclusion

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante.

Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle de "pâte de ciment". La pâte est un élément unique et actif du béton enrobant les granulats.

Le béton peut être utilisé dans divers domaines tels que dans la construction ou l'art. A la fois résistant et durable, il répond à de nombreux critères de performance, ce qui explique son omniprésence actuelle.

Chapitre II

Généralités sur les bétons

II.1. Introduction

En 1910, Porter a suggéré pour la première fois l'utilisation de fibres métalliques dans le béton dans l'optique d'améliorer les performances mécaniques du béton. Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures. Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BFM), en tant que matériau dans les applications industrielles, a vu le jour aux Etats-Unis au début des années 60 suite aux travaux de Porter conduisant au dépôt d'un brevet. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un super plastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent.

II.2. Définition de béton de fibres

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées, dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée la distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulat filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci [15].

II.3. Les fibres

II.3.1. Définition des fibres

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (5- 60mm) et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75mm.

Les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse de béton.

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt de leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication de béton prêt l'emploi du béton préfabriqué et du béton projeté fabriqué à partir soit d'acier, soit de plastique, de verre, de matériaux naturels. Elles sont ajoutées au béton lors du malaxage [19].

II.3.2. Différents types de fibres [15]

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, ... etc.), leur dimension (macro ou micro- fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont :

II.3.2.1. Fibres naturelles

➤ Fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ... etc), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles. Les fibres d'amiante autrefois utilisée pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes.

➤ Fibres végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent à la plupart des acides organiques mais sont détruite par les acides minéraux forts. Il existe quatre sorts de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres de liber. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).

II.3.2.2. Fibres synthétiques

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester etc). Elles sont apparues à la fin du XIXème siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent des produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus.

Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balle, les fuselages et ailes d'avion.

II.3.2.3. Fibres artificielles

Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autre. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Nous allons présenter quelques principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

II.3.2.4. Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille de polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant les processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées.



Figure II.4. Les fibres de polypropylène.

L'ajout des fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades de plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

II.3.2.5. Fibres de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate.



Figure II.5. Les fibres de verre.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice.
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues...).
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- Conductivité thermique relativement faible.

II.3.2.6. Fibres métalliques

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

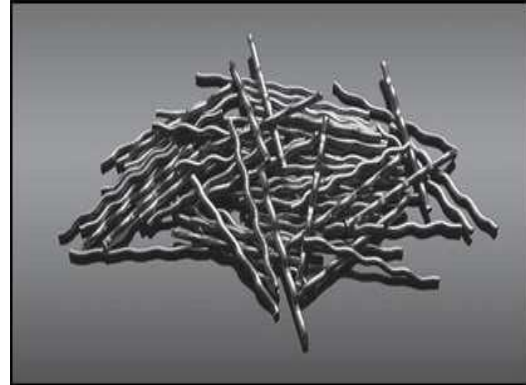


Figure II.6. Les fibres métalliques.

la matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Ce qui les conduits aux nombreuses variétés de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré, rectangulaire). Leur longueur et leur mode d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

II.3.3. Critère de choix du type de fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.

La nature, la forme, et les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques des fibres choisies dépendent de :

- La qualité a conféré à la matrice cimentaire.
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats ».
- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.
- Conservation de leurs propriétés dans le temps.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients.

Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) [15].

Les fibres en amiante utilisées avec le ciment ont prouvé la bonne tenue, et la durabilité du composite dans le temps ; Par contre les fibres de verre leur performance mécanique chute par la réaction de ciment sur le verre (effet des alcalins) Malgré que ce problème soit solutionné en partie par une mise au point d'un verre à haute teneur en zirconium l'utilisation des fibres de verre est toujours limitée.

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés. La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton :

- Protection par le ciment.
- Bonne adhérence.
- Coefficient de dilatation est presque le même.
- Grande résistance.

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. Leur géométrie est très variable (**Figure II.4**). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration. Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment [15].

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

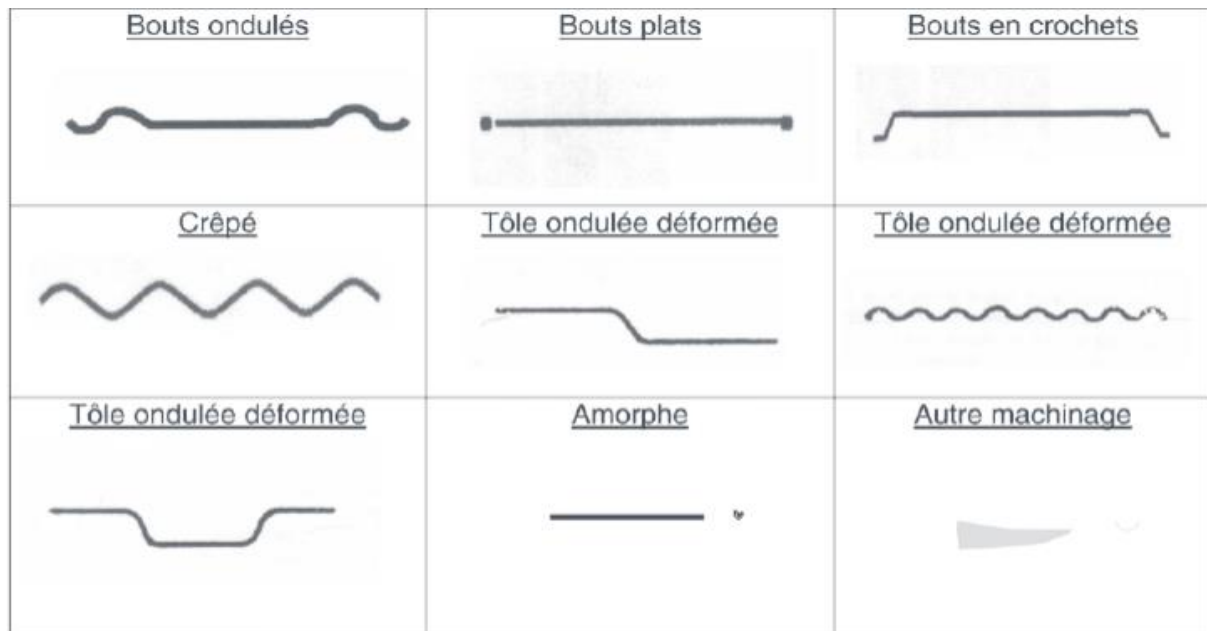


Figure II.7. Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques). Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

II.4. Déchet

Le déchet est : « tout résidu d'un 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 ».

II.4.1. Origine de la production des déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes [14] :

- **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière.
- **Technologiques** : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- **Économiques** : les produits ont une durée de vie limitée ;
- **Écologiques** : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- **Accidentelles** : l'inévitable dysfonctionnement des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

II.4.2 Constitution chimique des déchets

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provenant d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [14].

II.4.3. Valorisation des déchets

II.4.3.1. Les déchets pneumatiques

Un pneu est constitué principalement de caoutchouc et contient également de l'acier (de 16 à 27% en masse selon le type de véhicule). L'ensemble des Pneumatiques Usagés (PU) des véhicules comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Ce sont des déchets industriels non dangereux devant être éliminés. Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances (esthétique, ou liée au développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité.

Tableau II.2. Composition des pneus tourisme et poids lourd

Matériaux	Pneus tourisme (%)	Poids lourds (%)
Caoutchouc/élasto mètre	48	43
Noir de carbone et silice	21.5	21
Métaux	16.5	27
Textiles	5.5	-
Oxyde de zinc	1	2
Soufre	1	1
Autre produit chimique	7.5	6

II.4. Rôle des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Ils n'ont constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets [18] :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure (II.8).

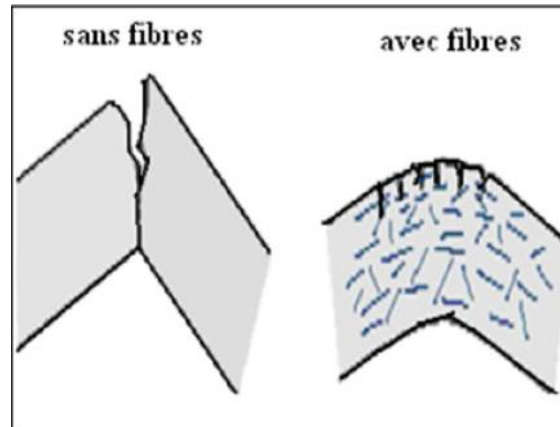


Figure II.8. Rôle de fibre dans le béton 1.

- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

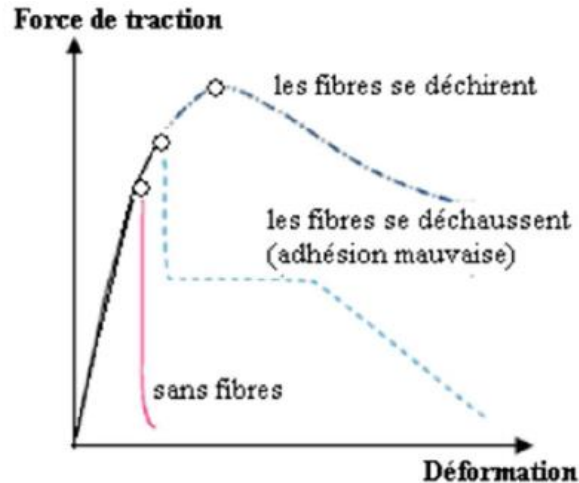


Figure II.9. Rôle de fibre dans le béton 2.

Les fibres peuvent également, dans certaines applications, remplacer les armatures passives. Elles ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire.
- L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration.

- La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge.
- La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).
- L'augmentation de la résistance à la traction par flexion.
- L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.
- L'amélioration de la résistance mécanique au jeune âge

II.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques, les principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.3 Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées.

Fibres	Diamètre (Um)	Long (mm)	Densité	R _t (MPa)	E 10 ³ MP a	Allongement a la rupture %	Coef de dilatation (u/m)	R _{feu} Temps max °C
Acier	5.500	20 -80	7.8	1000 - 3000	200	3-4	11	1500
Fonte	36*2600 de section	50 -60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5 – 20	40-70	2.6	1500-3000	80	2 - 3.5	9	
Polypropylène	10 - 200	25-75	0.9	400 - 750	5 - 10	15 – 25	9	150
Polyester	-	-	1.4	700 - 500	8	11 – 13	-	-
Amiante	0.02 – 20	5	2.5-3.4	3000	8 - 15	2 – 3	1	1500
Carbon	5 - 9		1.7 - 2	2000 - 3000	250 - 400	0.5 – 1.5	-	400 -1500
Sisal	10 - 50	1.5	1.5	-	130	3	-	

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

Être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ; se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) lors du bétonnage.

➤ Remarque

L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend de leur dimension et de leur dosage. Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent :

- Être déformables sans être fragiles ;
- Être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ; offrir une bonne capacité de déformation ;
- Posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire ;
- Présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

II.6. Mécanismes de fonctionnement des fibres

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macro fissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent couvrir les microfissures, et retarder la formation des macro fissures, conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure [13].

De plus, l'action des fibres est fortement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans le cas de fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leur lèvre et les fibres travaillent en traction.

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour les bétons de compacité courante. Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs, comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement, si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre-matrice, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre [14].

II.7. Domaine d'applications des bétons de fibres

Le tableau suivant présente les domaines d'application de béton fibres en fonction de type de fibre utiliser :

Tableau II.4 Domaines d'application des bétons fibres.

Type des fibres	Dosage courant	Domaine d'application privilégié	Exemples d'application
Fibres métalliques	0,5 à 2% en volume 40 à 160 Kg /m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	-Dallages, sois industriels, planchers, dalles de compression -Eléments préfabriqués voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux -Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation en pente et ouvrages d'assainissements -Pieux de fondation
Fibres de polypropylènes	0,5 à 2% en volume 0,5 à 2 Kg /m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue en feu des bétons	-Dallages -Voussoirs tunnels -Revêtements d'ouvrages souterrains -Mortiers projetés -Parements esthétiques
Fibres en verre	1 à 2%	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	-Parements architectoniques -Panneaux de façade -Eléments décoratifs

II.8. Orientations et distributions des fibres

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Peterson a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L, qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci.

Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres soit observée par rapport aux gros granulats.

Par ailleurs, il a été constaté que la majorité des fibres étaient orientées dans le sens de l'écoulement ; cet effet était plus prononcé pour des fibres de plus grande longueur [17].

Groth et Nemegeer ont aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion [16].

II.9. Avantages du béton fibré

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépend a du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

- ❖ Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
- ❖ Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (Résistance résiduelle) ;
- ❖ Une énergie d'absorption élevée
- ❖ Une résistance aux impacts, élevée ;
- ❖ Une résistance à la fatigue élevée ;
- ❖ Une augmentation de la résistance en cisaillement

II.10. Conclusion

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

Chapitre III

Généralités sur les bétons

III.1. Introduction

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps un grand développement et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. On peut améliorer la résistance mécanique (post-fissuration) du béton en y incorporant des fibres (dosages traditionnels de l'ordre de 600 à 1200 g/m³). L'incorporation de celles-ci dans le béton rend ce dernier davantage ductile (moins fragile), multi fissurant, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue. Différents types de fibres peuvent être utilisés avec des propriétés spécifiques.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant avec des granulats plus petits. Pour le renforcement, les fibres sont de types variés. Elles sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élanement (le rapport de la longueur de la fibre sur le diamètre équivalent à la fibre), et la teneur en volume de fibre.

La fabrication d'un béton de fibre ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. C'est à dire qu'il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. On ajoute directement des fibres dans le mélange du béton. L'effet de cette addition est la maniabilité décroissante. Pour l'amélioration, il convient d'utiliser une quantité de fine (sable et ciment) plus haute que pour un béton ordinaire. En ce qui concerne les fibres, on utilise une faible longueur et un élanement moyen car il y a risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en œuvre et nuisent au comportement mécanique. On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

III.2. Définition des bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton, des fibres afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (compression, fissuration, flexion). A la déférence des armatures, les fibres sont réparties dans la masse du béton ; elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, et les fibres synthétiques.

III.3. Les travaux réalisés sur les Bétons de fibres

III.3.1. Etude de Bensaid BOULEKBACHE et All

Cette étude a été réalisée en mai 2013, elle est intitulée « Comportement des bétons fibrés à la flexion : influence des fibres et de la résistance à la compression ».

Ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale sur le comportement à la flexion des bétons de fibres métalliques. On étudie l'effet de la rhéologie du béton sur l'orientation des fibres et l'influence de l'orientation sur les propriétés mécaniques. Les résultats montrent que la fluidité des bétons est un paramètre essentiel de l'orientation des fibres. Dès lors que l'on obtient une orientation dans le sens de l'efficacité mécanique, la résistance à la flexion est nettement améliorée. Ainsi la rigidité de l'ancrage des fibres est liée aux caractéristiques rhéologiques et mécaniques de la matrice.

III.3.1.1. Matériaux et matériel utilisés

Trois types de bétons sont formulés selon les proportions indiquées au tableau 1. Les fibres utilisées sont des fibres métalliques munies de crochets à leurs extrémités de résistance à la traction de 1100 MPa. On a utilisé trois dosages volumiques en fibres 0 %, 0,5 % et 1 % et deux élancements 65 et 80.

Les bétons sont confectionnés dans un malaxeur d'une capacité de 100 litres. Des prismes de dimensions 15x15x70 cm sont testés en flexion à quatre points. Une entaille de 1 cm de profondeur est effectuée au milieu des prismes pour favoriser la localisation de la fissure dans la partie étudiée. Les éprouvettes destinées aux essais de compression sont des éprouvettes cylindriques 11x22 cm. Elles sont soumises à une vibration externe (table vibrante) sauf en ce qui concerne le béton autoplaçant. Par la suite, les éprouvettes sont conservées dans une salle dotée d'une climatisation qui assure une température de 20 °C et une humidité relative de 90±5 %. Trois éprouvettes pour chaque essai ont été testées. Les résultats des essais des bétons à l'état frais sont présentés dans le tableau III.5.

	BO	BOF	BAP	BAPF	BHP	BHPF
Ciment (kg/m ³)	275	275	425	425	425	425
Fumée de silice (kg/m ³)	0	0	0	0	42,5	42,5
Filler calcaire (kg/m ³)	90	90	200	200	90	90
Eau (kg/m ³)	178	178	192	192	161	161
Superplastifiant (kg/m ³)	0	1,95	5,10	7,22	4,25	6,75
Gravier 4/10 (kg/m ³)	910	900	825	814	825	814
Sable 0/4 (kg/m ³)	830	820	750	740	750	740
E/L	0,49	0,49	0,31	0,31	0,29	0,29
Affaissement (cm)	24	21	/	/	16	10
Étalement (cm)	/	/	70	65	/	/
Contrainte seuil (Pa)	45	/	36	/	120	/

Tableau III.5. Formulation et caractéristiques rhéologiques des bétons testés

III.3.1.2. Résultats et discussions

III.3.1.2.1. Orientation des fibres

L'orientation des fibres des différentes configurations a été étudiée. La répartition des fibres dans la matrice peut être modifiée selon la rhéologie du béton. Le nombre de fibres dépend du dosage volumique V_f , des dimensions des fibres et de leur état de distribution. Il est exprimé par l'expression suivante [SOU, 1990] :

$$N = \alpha \frac{V_f}{A_f} A \quad \longleftrightarrow \quad \alpha = \frac{A_f}{AV_f} N$$

Avec α : coefficient d'orientation, A : section de l'éprouvette ; A_f : section de la fibre.

Nous avons compté les fibres dans la section de prismes rompues par flexion. Nous constatons que les fibres avec un élanement de 80 sont mieux orientées que celles avec un élanement de 65. L'effet de la vitesse d'écoulement sur la rotation des fibres devient important avec la diminution de l'allongement et donc les fibres s'orientent aléatoirement et par conséquent les orientations préférées deviennent plus faibles [STÄ 08]. En outre, pour des dosages de 0,5 %, on a eu de bonnes orientations par rapport aux dosages de 1 %, cette différence est due à la rhéologie des bétons affectée par le surplus de fibres qui ont un effet néfaste sur la mise en œuvre des bétons.

Il est important de noter que les bétons fluides en particulier les bétons autoplacants ont eu des facteurs d'orientation plus élevés et une distribution plus homogène sur toutes les poutres. L'utilisation des BAP fibrés est conseillée.

III.3.1.2.2. Résistances mécaniques

Les bétons testés se différencient par leur résistance en compression à 28 jours ($f_{c28}(\text{BO}) = 29 \text{ MPa}$; $f_{c28}(\text{BAP}) = 61 \text{ MPa}$ et $f_{c28}(\text{BHP}) = 80 \text{ MPa}$) et par la fluidité (BAP très fluide, BO fluide et BHP plastique).

La figure 3 montre les courbes charge-flèche. On constate que le matériau avec 1 % de fibres présente un comportement mécanique très amélioré par rapport au matériau avec 0,5 % surtout au niveau du pic. A noter que dans la matrice de haute résistance (BHP), une baisse soudaine de la charge s'est produite juste après la charge maximale qui a mené aux réductions significatives de la ductilité. Pour les BAPF et après une redistribution de contraintes, plusieurs fissures apparaissent après la première fissuration, signe d'une bonne distribution et orientation des fibres dans la poutre.

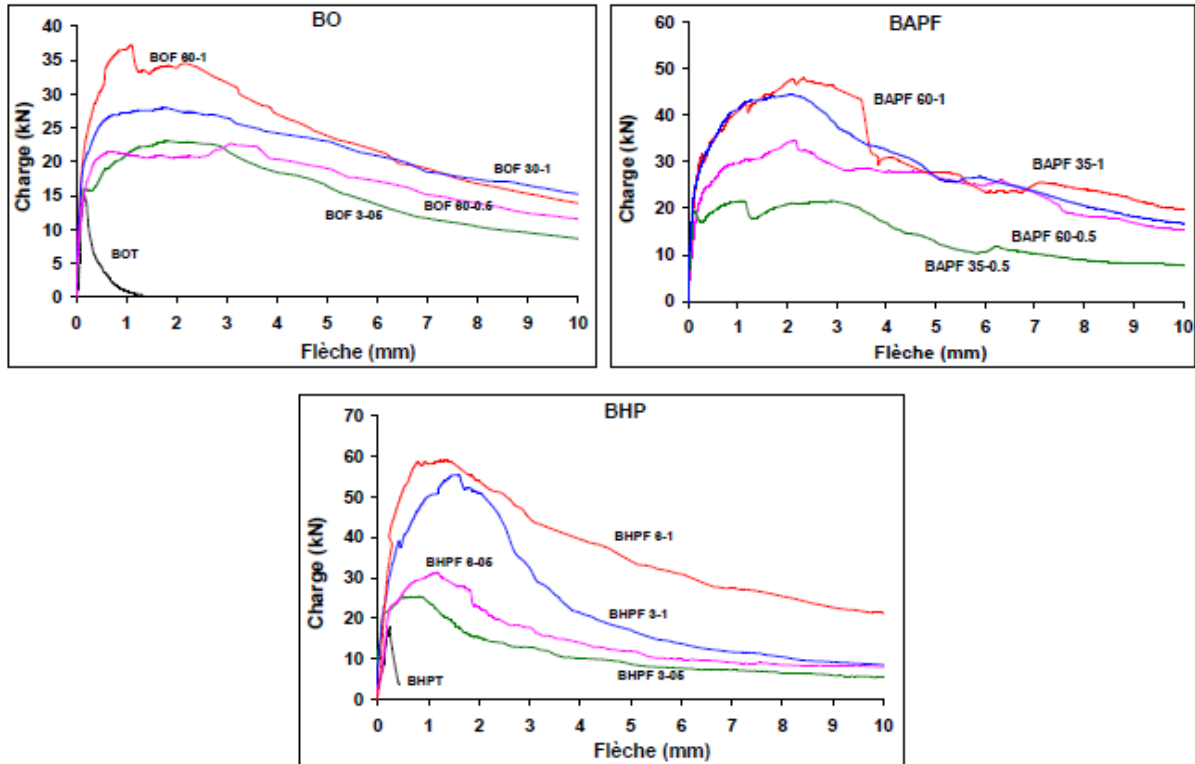


Figure III.10. Formulation et caractéristiques rhéologiques des bétons testés

Les charges de première fissuration et ultimes sont présentées dans la figure 2. Les charges de première fissuration sont influencées par la résistance de la matrice (figure 2(a)), par contre les charges ultimes dépendent du dosage et de l'élançement des fibres (figure 2(b)). Une formule de régression pour prédire la résistance à la flexion f_u d'un béton de fibres en fonction du béton sans fibres f_0 et le facteur de fibres $V_f (L/d)$ est donnée comme suit :

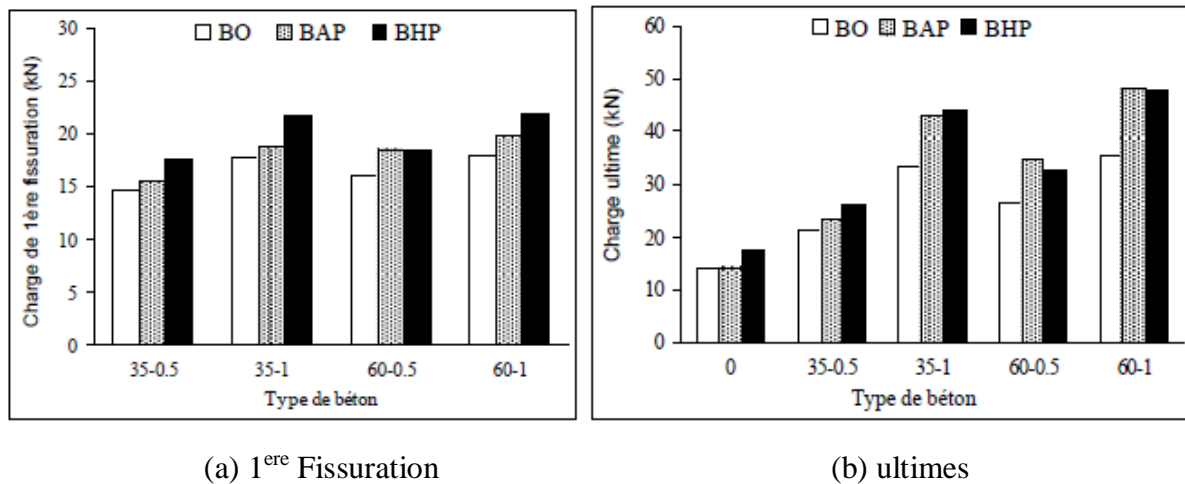


Figure III.11. Charges de 1ère fissuration et ultimes des différentes configurations

III.3.1.2.3. Influence de la résistance de la matrice

A partir de la figure 4, la fluctuation de la variation de la charge ultime moyenne varie entre 1 % et 21 % pour 0,5 % de dosage et 39 % et 44 % pour 1 % de dosage.

La charge ultime avec 0,5 % de fibres d'élanement 65 est améliorée de 147 %, 150 % et 147 % pour les BOF, BAPF et BHPF respectivement. Pour un dosage de 1 % de fibres d'élanement 80, cette amélioration est de 189 % et 198 % pour les bétons BOF, 228 % et 242 % pour les BAPF et 203 % et 218 % pour les BHPF.

L'effet de la résistance du béton sur le comportement en flexion n'est pas important. En revanche, pour un dosage de 1 %, l'effet est plus ou moins remarquable, dû essentiellement à l'augmentation des frottements entre la matrice et les fibres qui sont plus nombreuses dans ce cas. Donc à égale section totale de fibres interceptées par une fissure, si l'on désire dissiper la même énergie par frottements, il est préférable d'utiliser une fibre plus longue lorsque la compacité de la matrice diminue.

Plus la compacité de la matrice est faible, plus la plastification de la fibre a un poids important vis-à-vis de l'énergie totale dissipée durant la rupture du composite. Au contraire, plus la matrice est compacte, plus c'est le frottement qui prime.

III.3.1.2.4. Influence du dosage

Pour une variation de dosage de 0,5 % à 1 % de fibres d'élanement 65, la reprise de charge passe de 147 à 189 % pour les BOF, de 150 % à 228 % pour les BAPF et de 147 % à 203 % pour les BHPF. Pour l'élanement 80 avec un dosage variant de 0,5 % à 1 %, la reprise passe de 166 % à 198 % pour les BOF, de 187 % à 242 % pour les BAPF et de 178 % à 218 % pour les BHPF.

L'amélioration de la résistance à la première fissuration est due au transfert de l'effort à partir de la matrice aux fibres par le cisaillement interfacial et par l'adhérence la surface des fibres et la matrice. L'effort est ainsi partagé par les fibres et la matrice.

Nous pouvons constater, que doubler le dosage en fibres, ne signifie pas systématiquement un gain de même grandeur. Cette constatation est expliquée par l'effet de groupe conduisant à une contribution solidaire de plusieurs fibres. Il faut noter que les bétons autoplaçants ont prouvé une meilleure performance dans la reprise de charges après fissuration, où un maximum de 242 % a été enregistré

III.3.1.2.5. Influence de l'élançement

La charge ultime moyenne avec 0,5 % de fibres est de l'ordre de 147 % et 166 % pour les bétons BOF, 150 % et 203 % pour les BAPF et 147 % et 178 % pour les BHPF pour un élançement passant de 65 à 80. Pour un dosage de 1 %, cette augmentation est de 189 % et 198 % pour les bétons BOF, 228 % et 242 % pour les BAPF, 187 % et 218 % pour les BHPF et pour des élançements respectifs de 65 et 80.

L'élançement n'a pas un effet significatif en comparaison avec le dosage. Néanmoins, nous constatons que les bétons avec des fibres d'élançement 80 ont un comportement mécanique en flexion meilleur que celui relatif à l'élançement 65. L'hypothèse la plus plausible pour expliquer cette différence est que la surface de contact entre les fibres et la matrice pour l'élançement 80 est supérieure à celle relative aux fibres d'élançement 65 malgré que les fibres d'élançement 65 sont plus nombreuses dans la matrice que les fibres d'élançement 80 pour un même dosage volumique.

III.4. Conclusions

A partir des résultats des essais, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Une augmentation quasi linéaire de la résistance à la flexion du béton fibré en fonction du dosage volumique des fibres.

III.2. Etude de Ali ELLOUZE et Ali

Cette étude a été réalisée en Décembre 2005, elle est intitulée « Etude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux ».

Ce travail consiste d'une part à faire la formulation d'un béton à fibres métalliques à base de matériaux locaux (ciment, gravier et sable) et d'autre part dans l'étude de l'effet des fibres sur le comportement des poutres en béton armé. Deux types de fibres ont été utilisés : fibres longues (50 mm) et fibres courtes (35 mm).

La formulation a pour objectif la recherche du pourcentage optimal des fibres et en adoptant comme critère la maniabilité du béton.

Pour le dosage optimal retenu en fibres, on a étudié l'influence des fibres sur le comportement mécanique du béton (résistance à la compression, résistance à la traction et ductilité). Une étude sur l'effet des fibres sur la rigidité à la flexion des poutres en béton armé.

Les résultats de cette étude ont mis en évidence l'amélioration aussi bien des caractéristiques mécaniques (indiquées ci-dessus) du béton que la rigidité à la flexion.

III.2.1. Introduction

Les fibres, lorsqu'ils sont ajoutés au béton, permettent son renforcement en s'opposant à la propagation des fissures et ainsi ils améliorent sa ductilité.

Nous avons mené une étude sur le Béton à Fibres Métalliques (BFM) à base de matériaux tunisiens. Les matériaux de construction proviennent des régions au voisinage de Sfax (Tunisie). Les fibres employées sont des fibres Sika métal à deux crochets et elles sont de deux types :

- Fibres Longues (FL) de référence RC80/50-BN: longueur 50 mm et diamètre 0,62 mm.
- Fibres Courtes (FC) de référence RC65/35-BN : longueur 35 mm et diamètre 0,55 mm.

Cet article a pour objectif d'étudier l'effet des fibres sur le comportement mécanique des bétons à Fibres Métallique (BFM). L'étude est portée sur la résistance en compression et en traction (directe, par flexion trois points et par fendage), le module de Young. L'étude a été étendue vers le suivi de la fissuration en fonction des dimensions et du pourcentage des fibres métalliques. Enfin, notre travail s'est intéressé à l'étude de l'effet des fibres sur la flexion des poutres rectangulaires (pivot A et pivot B) et sur l'effort tranchant.

III.2.3. Formulation

Il est connu que les fibres diminuent la maniabilité du béton de fibres métalliques [1,2]. En tenant compte des recommandations de ces travaux, nous avons procédé pour la formulation, la démarche expérimentale suivante :

- Nous avons fait varier le rapport Gravier / Sable (G/S) pour obtenir un rapport donnant la maniabilité optimale et une bonne résistance.
- Nous avons ajusté la quantité de superplastifiant pour obtenir un pourcentage donnant la résistance optimale et une bonne maniabilité.

III.2.4. Recherche du pourcentage optimal de superplastifiant

Un adjuvant, qui est le superplastifiant « Viscocrète 5400F » de Sika, est ajouté au béton étudié. La variation de la maniabilité (à travers l'affaissement) et de la résistance en fonction du pourcentage de l'adjuvant, par rapport à la masse du ciment.

Ces courbes montrent que ce pourcentage, qui donne une bonne maniabilité et une meilleure résistance à la compression, est égal à 1,5 % par rapport à la masse du ciment.

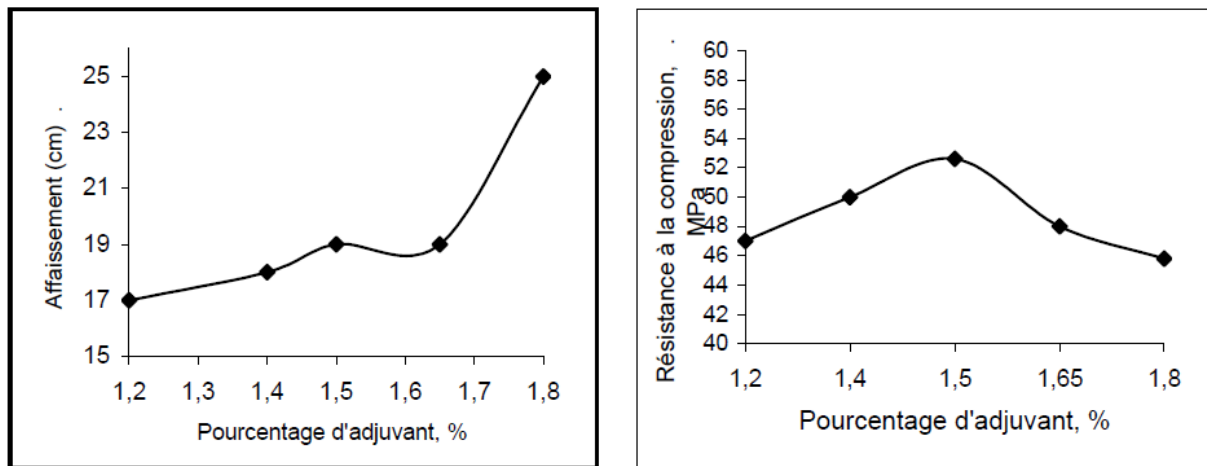


Figure III.12. Evolution de l'affaissement et de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'adjuvant pour un rapport G/S = 1,2.

La composition du béton témoin optimisée sans fibres est présentée dans le tableau III.6. A partir de ce béton témoin, le BFM est obtenu en introduisant la masse de fibres à étudier.

Tableau III.6. Composition du béton témoin (pour un m³)

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

III.2.5. Effet des fibres sur la maniabilité.

La figure 3 montre l'évolution de l'affaissement et du temps d'écoulement en fonction de la masse des fibres. Ainsi, nous pouvons en déduire que :

- Une augmentation de la masse de fibres par m³ réduit la maniabilité,
- Les fibres courtes (FC) affectent moins la maniabilité que les fibres longues (FL),
- Le BFM reste maniable allant jusqu'à un dosage de 50 kg/m³ des fibres.

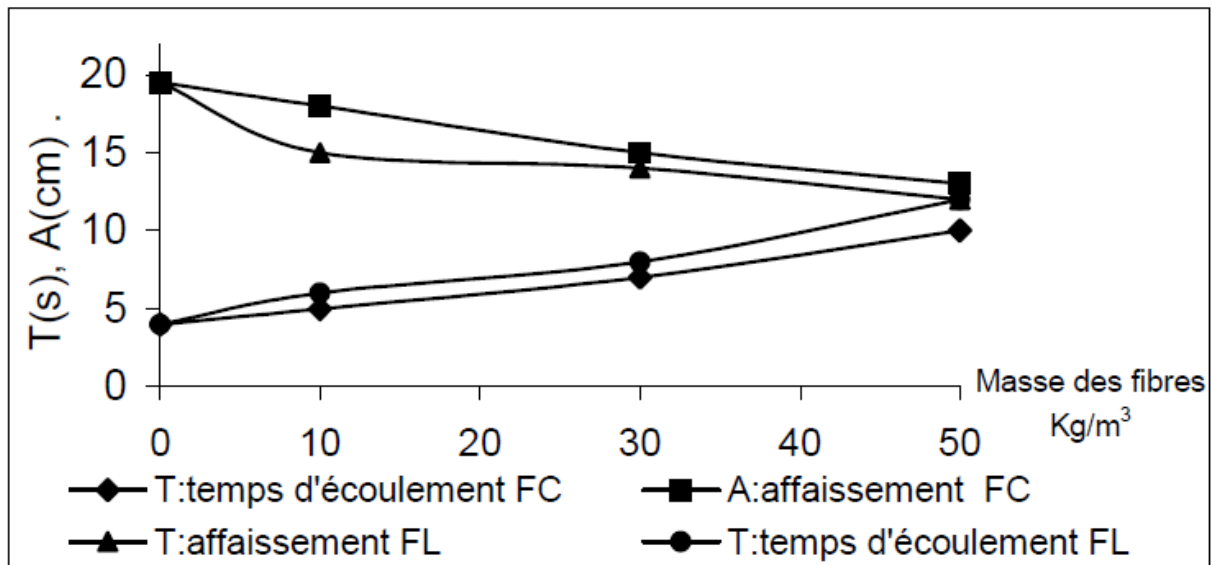


Figure III.13. Évolution de l'affaissement et du temps d'écoulement en fonction de la masse des fibres

III.2.6. Effet des fibres sur la résistance

Les résultats regroupés dans le tableau III.7 donnent les valeurs moyennes en MPa relatives aux trois essais de compression et de traction (par fendage) sur des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm pour le béton témoin et les bétons de fibres métalliques (BFM).

Tableau III.7. Résultats des essais de compression et de traction (par fendage) (MPa)

Essais	âge	Béton témoin	Dosage de FL : RC 80/50-BN			Dosage de FC : RC 65/35-BN		
			10 kg/m³	30 kg/m³	50 kg/m³	10 kg/m³	30 kg/m³	50 kg/m³
compression	3 jours	15,7	30,7	37,9	26,4	29,0	31,5	32,8
	7 jours	33,9	37,5	41,9	40,6	35,3	41,3	40,3
	28 jours	49,8	52,8	55,3	46,9	50,1	53,9	49,6
traction par fendage	7 jours	3,0	3,5	5,2	5,0	3,4	4,7	5,3
	28 jours	3,6	4	6	4,9	4	5,2	5,1

Le tableau III.7 montre que :

- Les fibres améliorent la résistance du béton aux jeunes âges.
- L'amélioration de la résistance maximale à 28 jours à la traction est plus significative que celle à la compression.
- Pour le dosage 50 Kg /m³, la résistance à la compression et à la traction diminue par rapport au dosage 30 Kg /m³. D'après Rossi et al.

Les fibres perturbent l'arrangement granulaire. On peut refaire la formulation avec la même méthode expérimentale en introduisant le dosage en fibres à étudier. (le rapport Gravier/Sable (G/S) diminue avec l'augmentation de la masse de fibres par m³).

III.2.7. Effet des fibres sur la fissuration, la ductilité et la déformation

Des éprouvettes 7x7x28 cm ont été confectionnées. Les résultats des essais de la flexion à trois points sont représentés à travers les courbes de l'évolution de la contrainte de flexion en fonction de la flèche (Fig. 5) et des courbes de l'évolution de la contrainte de compression en fonction du raccourcissement (Fig. 6). A partir de ces résultats, nous en déduisons que les fibres métalliques :

- Retardent l'apparition des fissures,
- Augmentent la contrainte maximale,
- Améliorent la ductilité et la déformation.

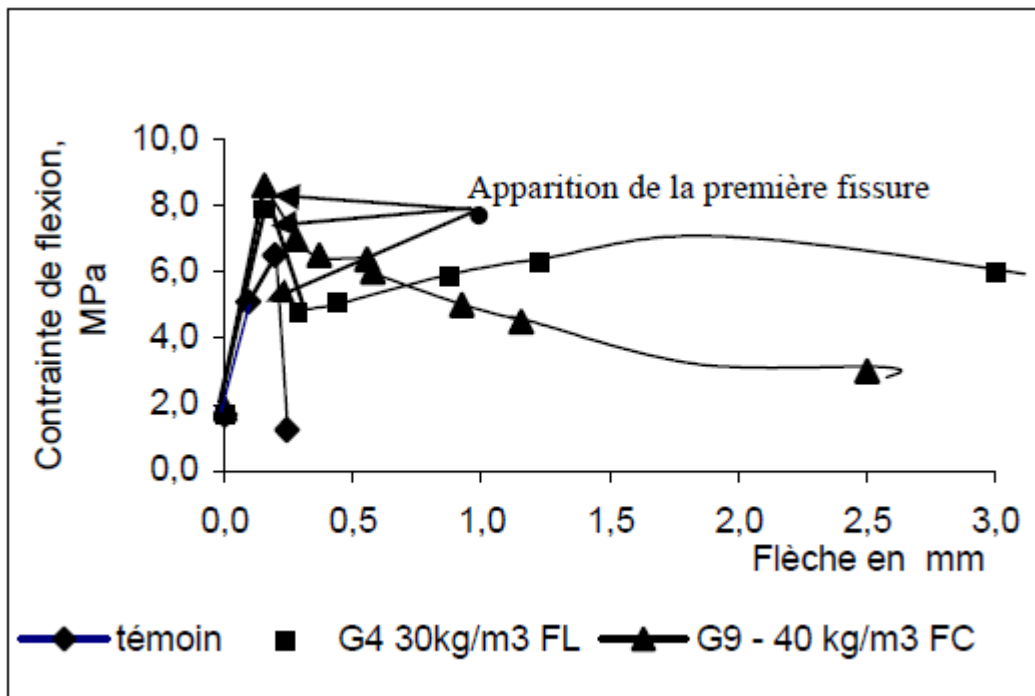


Figure III.14. Évolution de la contrainte de flexion en fonction de la flèche.

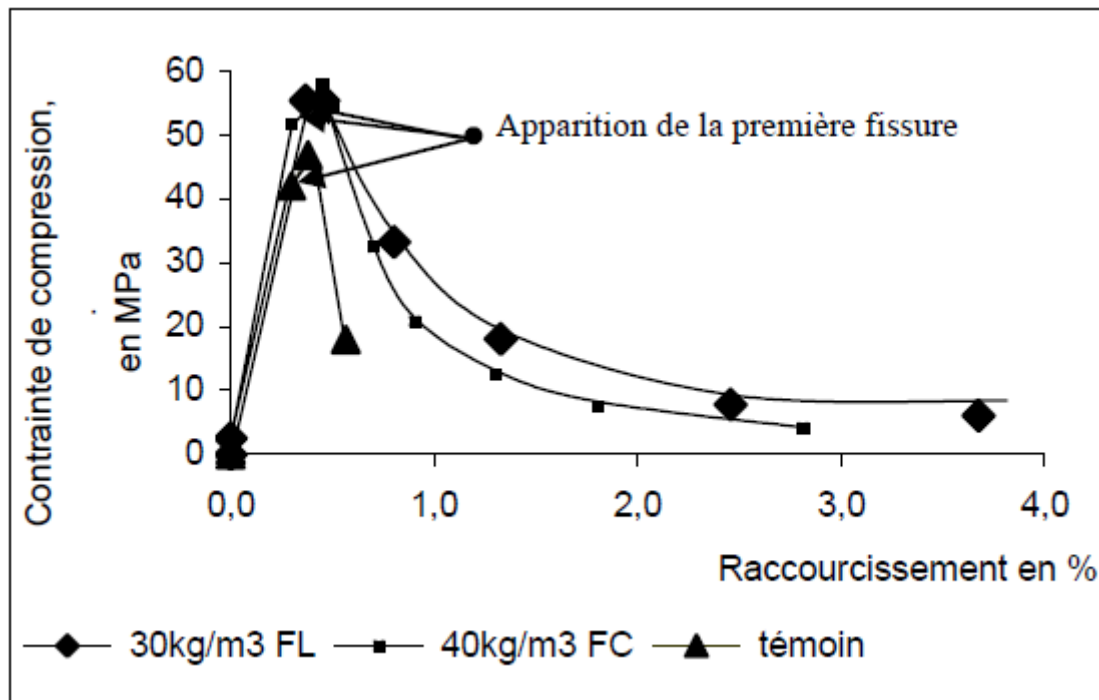


Figure 15. Évolution de la contrainte de compression en fonction du raccourcissement.

Ainsi, les fibres métalliques ont le pouvoir de couder les fissures et retarder ainsi leur propagation et leur localisation. Il en résulte ainsi une meilleure ductilité et résistance à la déformation.

III.2.8. Comportement en compression

Six éprouvettes 16 x 32 cm ont été testés en compression (pour les quatre types de bétons traités). Pour chaque éprouvette, nous avons déterminé la résistance à la compression et le module de Young. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.8.

Tableau III.8. Résultats des essais de compression et le module de Young des BFM.

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

Ces paramètres montrent une légère amélioration de la ductilité et des résistances à la compression. L'amélioration du module de Young peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges [3].

III.2.9. Conclusion

Cet article présente, en premier lieu la formulation d'un béton témoin optimisé sans fibres. En deuxième lieu, nous avons étudié l'influence le pourcentage des fibres incorporées dans un mètre cube de béton résultant en une amélioration nette des caractéristiques mécaniques.

III.3. Etude de Bensaid BOULEKBACHE et All

Cette étude a été réalisée en Avril 2009, elle est intitulée « Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques ».

Ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'influence de la rhéologie sur l'orientation des fibres métalliques et par suite sur le comportement en flexion et compression des bétons de fibres. Plus précisément, on étudie l'influence de l'orientation d'un volume de 0.5 % de fibres sur les propriétés mécaniques d'un béton ordinaire fluide, d'un béton auto-plaçant (seuil de cisaillement faible < 50 Pa) et d'un béton à hautes performances plastiques (seuil de cisaillement élevé > 100 Pa).

III.3.1. Introduction

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. Cependant, la notion d'une résistance en traction faible en comparaison de celle en compression est maintenue pour le BHP (Béton à hautes Performances) et avec l'augmentation de la résistance à la compression, le BHP devient fragile.

La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton.

Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro-fissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbants d'énergie [Rossi 1994]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée.

Concernant sa rhéologie, le béton est classé dans la famille des fluides non Newtoniens. C'est une suspension de granulats en forte concentration. Le plus souvent, on distingue la phase pâte constituée de ciment, d'eau et de fluidifiant, de la phase inerte granulaire composée de sable et gravier. L'ouvrabilité d'un béton est définie comme étant "une caractéristique qui détermine la facilité d'un béton ou d'un mortier dont le malaxage, la mise en place, la consolidation et la finition se sont déroulés dans des conditions homogènes". En condition de chantier, l'outil de caractérisation de l'ouvrabilité le plus courant dans le monde est le cône d'Abrams utilisé.

III.3.2. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en compression et en flexion

III.3.2.1. Comportement en compression

Les essais de compression sont exécutés selon la norme (NF EN 12390-3) sur trois cylindres (11x22cm). La présence des fibres réduit légèrement la résistance à la compression [Paillière 1993, Rossi 1994] ou tout au plus ne l'influence pas. Les fibres ont réduit la résistance à la compression de 7 %, 6 % et 5 % pour le BOF, BAPF et BHPF respectivement. En fait, les fibres travaillent efficacement quand elles sont soumises à la traction. Elles empêchent ainsi la propagation des fissures.

Lors de l'écrasement sous compression, ce rôle est très réduit voire inexistant en phase de pré fissuration, induisant même des défauts supplémentaires dans la matrice pouvant conduire à une faible compacité. Le comportement pré-pic est de ce fait logiquement quasi identique avec ou sans fibres. En revanche, la présence des fibres améliore le comportement post-pic et réduit la pente descendante de la courbe contrainte-déformation (Fig. III.16). Cette observation est particulièrement spectaculaire lorsqu'il s'agit du BHP fibré.

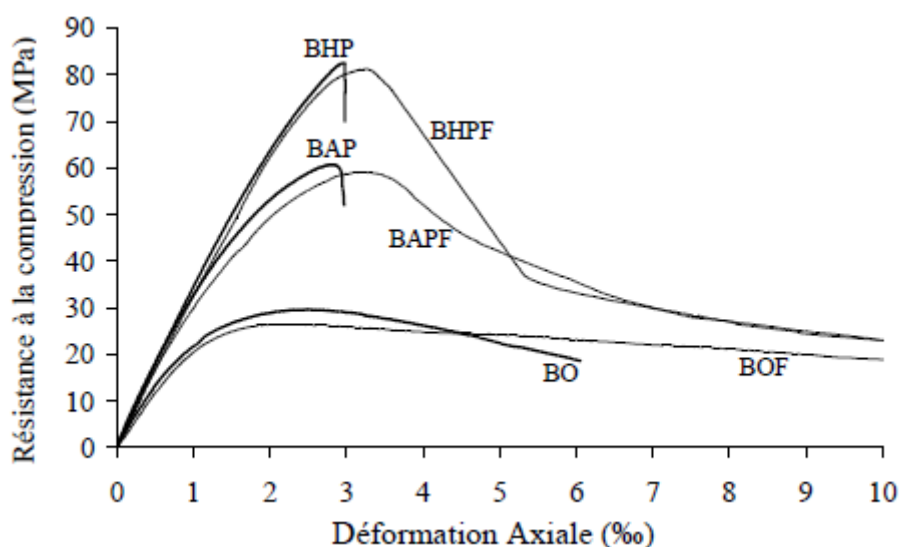


Figure III.16. Effet des fibres sur le comportement en compression selon le type de béton.

III.3.2.2. Comportement en flexion

L'essai consiste à rompre en flexion quatre points des éprouvettes prismatiques 15x15x70 cm. Le déplacement est contrôlé à une vitesse de 0,004 mm/s.

Le BHP testé a eu logiquement la résistance la plus importante (tableau 3). Elle est 17,5 % plus élevée que celle du BAP et 13,31 % plus élevée que celle du BO. Dans la configuration fibrée, le rôle de la fibre est actionné si elle est orientée dans le sens de la traction.

Cette efficacité est plus importante pour les bétons à hautes performances, grâce à une bonne adhérence du couple fibre-matrice. On remarque cependant que l'effet de la rhéologie, notamment le seuil de cisaillement, est fondamental.

Concernant les bétons fluides, la répartition des fibres observée est homogène et de plus les fibres sont orientées dans le sens de l'effort de traction induite par la flexion (Fig. 8). En revanche, dans les bétons plastiques (seuil de cisaillement élevé), on remarque une orientation aléatoire et un détachement partiel des fibres pré-collées en plaquettes (Fig. 9).

Au final, seule l'orientation de la fibre et donc la rhéologie a influencé de manière très significative la résistance à la flexion des poutres. Quantitativement, on observe en comparaison des bétons non fibrés un accroissement de résistance en flexion de 60 %, 66 % et 114 % respectivement pour les BOF, BHPF et BAPF.

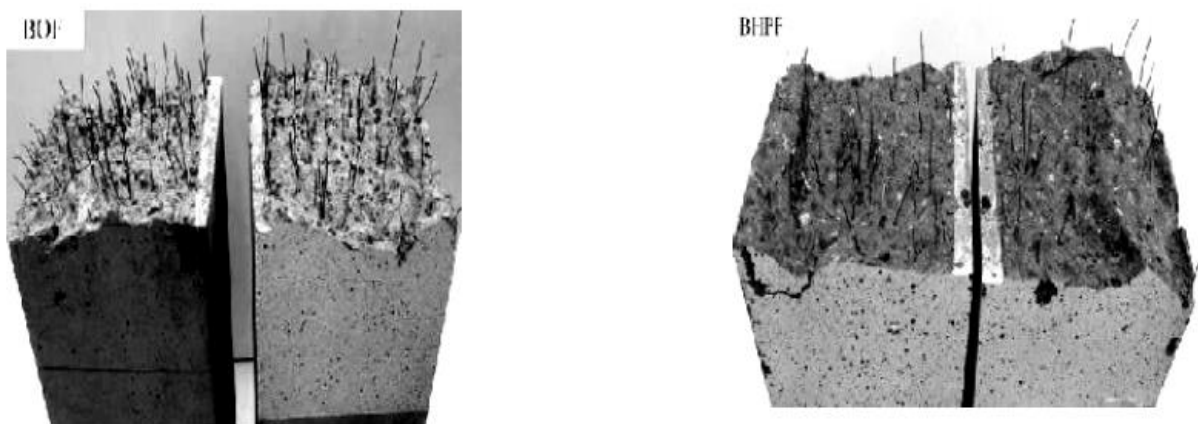


Figure III.17. Distribution et orientation des fibres à travers la section de rupture.

Les charges ultimes et les flèches correspondantes sont données dans le Tableau III.9. Les données présentées sont à chaque fois une moyenne de trois essais.

Tableau III.9. Paramètres de la résistance de flexion

Mélange	Facteur d'orientation α	Flèche à la 1 ^{ère} fissure (mm)	Flèche au pic (mm)	Charge de 1 ^{ère} fissuration (kN)	Charge de Pic (kN)
BOF	0,60	0,110	1,794	17,44	27,98
BAPF	0,66	0,154	3,458	19,08	40,77
BHPF	0,35	0,100	0,794	18,14	33,21

III.3.3. Conclusion

L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'influence de la rhéologie du béton sur l'orientation des fibres et par suite sur les performances des bétons. Une distribution homogène des fibres assurée par une faible contrainte seuil induit une ductilité nettement améliorée du béton fibré. Un transfert de charge est assuré dans l'ensemble de l'éprouvette. Une localisation de contrainte très prononcée est observée dans le cas des bétons fermes (BHPF).

III.3.4. Conclusion

L'ajout des fibres a un effet positif sur les caractéristiques mécaniques des bétons. Dans ce domaine, on peut citer l'amélioration des propriétés mécaniques et de la ductilité. Par ailleurs, la formation et la propagation des fissures sont retardées et les tailles de ces fissures sont largement réduites.

Les différents travaux réalisés sur les bétons des fibres montrant qu'il y a une augmentation remarquable de performance mécanique de béton de fibre par rapport aux autres types de béton. Les fibres ont une forte résistance à la traction ce qui explique la grande résistance de béton fibré en flexion.

Chapitre IV

Matériaux et méthodes

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter des essais sur le comportement mécanique, et la variation dimensionnelle sur les différents Bétons. Nous présentons également des tests expérimentaux dont ils doivent fournir des paramètres physico- mécanique nécessaires à la modélisation de comportement à la lixiviation. Les procédures expérimentales sont présentées dans ce qui suit selon leurs objectifs, principes expérimentales et modes opératoires.

IV.2. Caractéristiques des matériaux

IV.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé de type Portland composé CEM II/A de classe 42.5 provenant de la cimenterie de Sour El –Ghouzlane, CEM II/A 42.5 conformément à la norme NA 442 édition 2000. De nom commercial GICA.

IV.2.1.1. Caractérisation du ciment

Le tableau suivant représente la composition chimique du ciment utilisé:

Tableau IV.10. Composition chimique ciment CEM II/A 42.5

Eléments	%
CaO	61.79
SiO ₂	17.46
Al ₂ O ₃	4.41
Fe ₂ O ₃	3.22
MgO	2.02
SO ₃	2.12
K ₂ O	0.73
Na ₂ O	0.15

La figure suivante représente diagramme circulaire de la composition chimique du ciment.

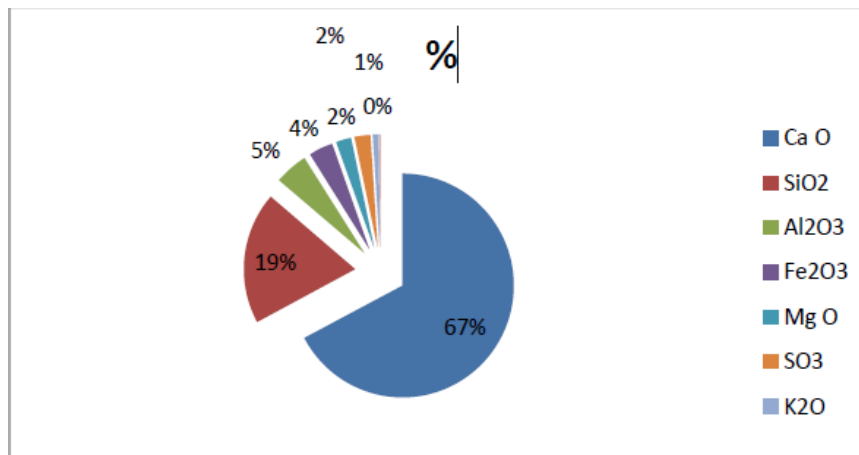


Figure IV.18. Diagramme circulaire de la composition chimique du ciment.

Le tableau IV.11. représente les caractéristiques minéralogiques de ciment.

Tableau IV.11. Caractéristiques minéralogiques de ciment.

Elément	%
Silicate tricalcique C_3S	68.08
Silicate bi calcique C_2S	12.75
Aluminates tricalciques C_3A	5.75
Alumino- ferrite titra –calcique C_4AF	11.66

IV.2.1.2. Essais sur la pâte de ciment à l'état frais

IV.2.1.2.1. Essais de prise (EN 196-3)

- **Objectif de l'essai**

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés conformément à la norme EN 196-3.

- **Principe de l'essai** Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement.

L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile est libérée l'aiguille s'arrête à une distance **d** du fond du moule telle que **d = 4mm ± 1mm**.

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5mm.

- **Équipement nécessaire utilisé**

1. Une armoire maintenue d'une manière continue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure ou égale à 90%
2. Appareil de Vicat est équipé de :
3. une aiguille de 1,13mm + porte aiguille
4. masse mobile de 1000g (partie mobile 300g + masse 700g)

- **Conduite de l'essai**

Le mode opératoire de l'essai est fixé par la norme **EN 196-3** :

1. confectionner une pâte normalisée. Le temps zéro est celui où le ciment a fini d'être ajouté à l'eau dans la cuve du malaxeur. La consistance recherchée de la pâte, une fois atteinte, la pâte est introduite dans le moule tronconique comme indiquée pour l'essai de consistance ;
2. Remplir le moule tronconique, et araser la face supérieure ;
3. Mettre le moule dans l'armoire en attendant, que la prise soit commencée ;
4. Quand le moment supposé du début de prise approche, on fait sortir le moule de l'armoire et on le met sur le socle de l'appareil
5. Immobiliser l'aiguille au contact de la pâte ;
6. Libérer la partie mobile sans vitesse initiale ;
7. Relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base ;
8. si l'arrêt se produit à une distance $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$; La prise est commencée ;
9. si non, on retourne le moule dans l'armoire qu'on le sortira qu'à intervalles de temps convenablement espacés jusqu'à ce que $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$;
10. On retourne le moule tronconique utilisé pour la détermination du début de prise de façon que les essais de fin de prise soient faits sur la face du moule en contact avec la plaque de base (voir la figure IV.19)

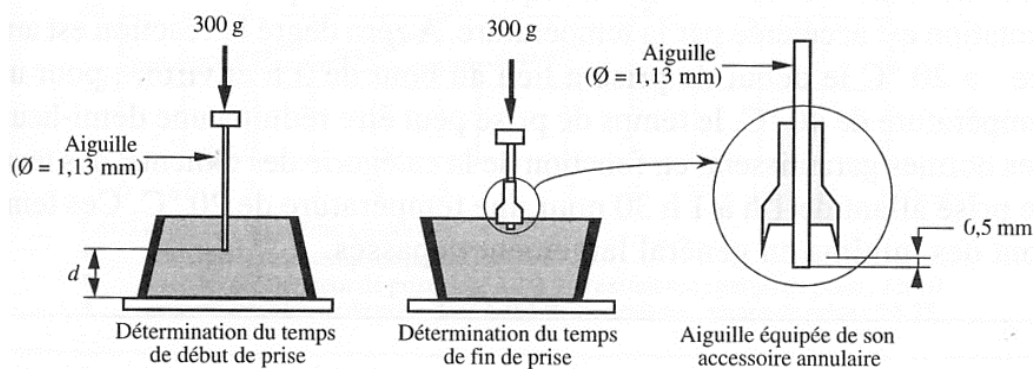


Figure IV.19. Essai de prise

IV.2.2. Essais sur les granulats

IV.2.2.1. Le sable

Dans tous les mélanges de notre étude, on a utilisé un sable de classe 0/3 commercialisé au niveau de la ville de BOUIRA, de la wilaya de BOUIRA.

IV.2.2.1.1. Analyse granulométrique (EN 933-1)

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous ainsi que la courbe obtenue.

- **Matériel utilisé**

Ce sont des tamis, qui sont constitués d'un maillage métallique ou d'un perçage d'une tôle définissant des trous carrés de dimensions normalisées. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carré, ces dimensions se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,08mm, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée un échantillon de diamètre $<0,08$ mm donc on procède par sédimentométrie. L'existence de passoires (trous ronds) a conduit à une double classification des tamis et des passoires, tout en conservant pour chaque famille d'appareil la même progression géométrique des ouvertures. Afin d'éviter toute ambiguïté, un tamis et une passoire équivalents désignées par un même numéro de module.

Les dimensions des tamis peuvent être repérées par des numéros : une suite continue de nombres entiers, allant de 20 pour le tamis de 0,08mm à 50 pour le tamis de 80mm.

La classification des dimensions nominales normalisées des tamis est représentée dans le tableau suivant :

Tableau IV.12. Dimension nominales des tamis selon la norme NF P 18-560

Modules	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0,08	0,100	0,125	0,16	0,200	0,250	0,315	0,40	0,50	0,53	0,80
Modules	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,3	8	10
Modules	42	43	44	45	46	47	48	49	50	/	/
Tamis (mm)	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	/	/

La figure IV.20 représente une série de tamis.



Figure IV.20. Série de tamis.

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

- **Conduite de l'essai**

- ✓ **Préparation de l'échantillon pour l'essai**

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **P 18-553**. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D est la plus grande dimension spécifiée en millimètres.

IV.2.2.1.2. Le module de finesse (NFP 18-540)

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (M_f).

Le module de finesse est égal au $1/100$ e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$$M_f = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis } \{ 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5 \}$$

Lorsque M_f est comprise entre :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier

III.2.2.1.3. Equivalent de sable (NF EN 933-8)

Il est défini par la norme NF EN 933-8; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fin, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- Hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- Hauteur h_2 : sable propre seulement.
- On en déduit la valeur de l'équivalent de sable par l'équation suivante :

$$ES = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

- Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine E_{sv} (équivalent de sable visuel) ou E_{sp} (équivalent de sable au piston).

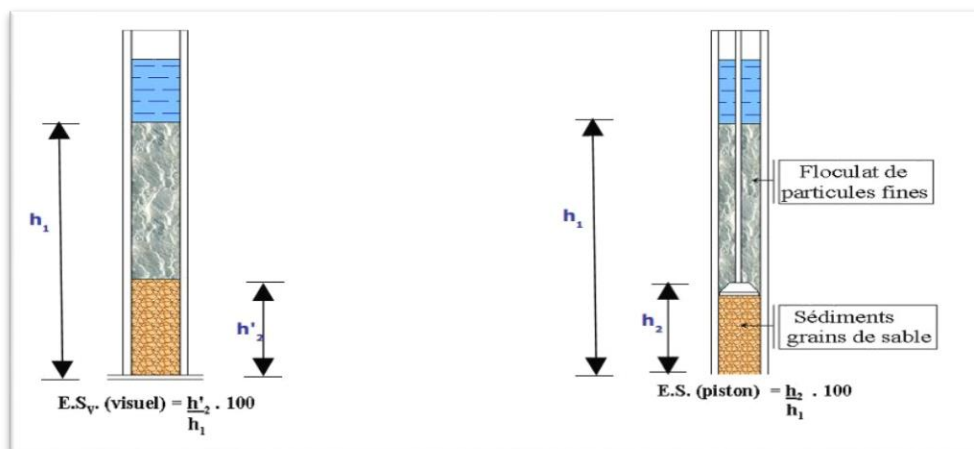


Figure IV. 21. Principe de l'essai d'équivalente de sable.

- **Equipement nécessaire**

Equipement nécessaire pour faire l'essai équivalent de sable :

1. Deux cylindres en plastique transparent de hauteur 43 cm et de diamètre 3,2 cm munis d'un bouchon en caoutchouc avec 2 traits repères.
2. Piston d'essai de longueur 43cm, dont le poids total est de 1 kg
3. Un tube laveur est également utiliser
4. Tamis de 2mm d'ouverture de mailles
5. Une balance électronique
6. Une règle de 500mm un entonnoir un chronomètre

7. Une solution lavante.

- **Préparation des échantillons de sable**

On réalise sur un échantillon une teneur en eau, la norme FD P18-663 précisant que l'échantillon n'a pas besoin d'être sèche a moins 2% d'humidité comme le prévoit la norme NF EN 933-8. Une fois la teneur en eau effectuée, on calcule la mass d'essai nécessaire a l'essai selon le calcule

$$M_{\text{nécessaire}} = 120(100+W)/100$$



Figure IV.22. Essai d'équivalent de sable.

- **Les valeurs courantes d'Esp et Esv**

Le tableau IV.13 représente les valeurs d'équivalent de sable qui indiquent la nature et qualité du sable .

Tableau IV.13. Les valeurs d'équivalent de sable indiquant la nature et qualité du sable.

ES visuel	ES au piston	Nature et qualité du sable
ESV < 65%	ESP < 60%	Sable argileux : risque de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65% < ESV < 75%	$60 \leq ESP < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
$75\% \leq ESV < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ESV $\geq 85\%$	$ESP \geq 80\%$	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

IV.2.2.2. Le Gravier

IV.2.2.2.1 Essai Los Angeles Résistance au choc (NF. P18.573)

La résistance au choc se fait par l'essai Los Angeles selon la norme NF P 18-573. L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6mm, produite par la fragmentation du matériau testé, et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations pendant 15mn.

La masse de la charge des boulets varie suivant les classes granulaires.

Si M et la masse du matériau soumis à l'essai. m la masse des éléments inférieure à 1.6 mm produite au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité : **100 m/M**

Cette quantité sans dimension est appelée par définitif

$$L_A = 100 \times (M - M_1) / M$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, "coefficient Los Angeles" du matériau.

- **Matériel utilisé**

1. La machine Los Angeles, comporte :

- ❖ Un cylindre creux en acier de 12 mm \pm 0,5 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de 711 mm \pm 1 mm et une longueur intérieure de 508 mm \pm 1 mm Le cylindre est supporté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ne pénétrant pas à l'intérieur du cylindre ; le montage est tel que le cylindre peut ainsi tourner sur son axe qui doit être horizontal
- ❖ Une ouverture de 150 mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon.

2. La charge est constituée par des boulets sphériques de 47 mm de diamètre environ et pesant 420 et 445 g.

3. Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tours/minute.

4. Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai, un compte tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.

- **Préparation de l'échantillon**

L'échantillon est préparé par quartage pour les deux classes granulaires, et d'après le tableau des classes granulaires, la masse de l'échantillon est 5000g pour les deux classes.

- **Exécution de l'essai**

-On introduit avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon de l'essai.

On place le couvercle. On fait effectuer à la machine 500 rotations, à une vitesse 30tr/min. Après que la machine s'arrête on fait recueillir le matériau dans un bac placé sous l'appareil, puis on fait tamiser ce matériau avec le tamis 1.6mm, après on lave le refus au tamis 1.6mm, enfin on le place dans un étuve à 105c pour qu'il soit sécher, après 24h on fait peser. Soit m' le résultat de la pesée.

$$LA = [(5000 - m') / 5000] * 100$$

IV.2.2.2.2. Détermination des masses volumiques des granulats ρ_s

La masse volumique absolue est déterminée convenablement à la norme NF P 18-554.

La masse volumique absolue « ρ_s » est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

IV.2.2.2.3. Méthode de l'éprouvette graduée

- **Conduite de l'essai**

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 . Peser un échantillon sec de granulat de masse M (150g), et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les boules d'air.

Le niveau monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 . La masse volumique absolue est alors :

$$\rho_s = M / (V_2 - V_1)$$



Figure IV.23 Détermination des masses volumiques absolues des granulats.

IV.2.2.3. Superplastifiant SIKA viscocrete 665 NF EN 934-2

Le Sika Viscocrete 665 est un Superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Le Sika Viscocrete 665 est compatible avec tous les ciments même avec un taux C3A faible.

IV.2.2.3.1. Domaines d'application

Le Sika Viscocrete 665 permet la fabrication :

- de bétons plastiques à auto-plaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- de bétons à longs maintiens de rhéologie (>2h30), sans reprise de fluidité dans le temps.

IV.2.2.3.2. Caractéristiques

Le Sika Viscocrete 665 est un Superplastifiant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie
- Evolution rapide des résistances à court et à long terme
- Réduction de la viscosité
- Amélioration de la stabilité du béton frais et limitation de la ségrégation avec des granulats concassés
- Pas de reprise de fluidité dans le temps
- Qualité de parement

IV.2.2.4. Les fibres métalliques

Les fibres Utiliser sont des fibres Métallique de Sika de forme Crochet, caractériser par :

Longueur : 30 mm

Diamètre 0.55 mm

Elancement L/d : 55

Resistance a la traction : 1345 MPa

IV.2.2.5. Les déchet de fibre métalliques

Sont des fibres récupérer a partir de déchets pneumatique par l'entreprise de recyclage des pneus qui est située à la Commune de El-Hachimeia -Wilaya de Bouira. Ces fibres sont caractérisées par :

Longueur : 50 mm ;

Largeur : 1 mm ;

Hauteur : 2 mm.

III.2.2.6. L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans notre étude est une eau de robinet du laboratoire LCTP de Bouira. Selon la norme NF EN 1008, l'eau potable est toujours utilisable dans la formulation des bétons et des mortiers.

IV.3. Méthodes d'élaboration

IV.3.1. Formulation des bétons

Après l'analyse et la caractérisation de tous les constituants, nous présentons les principaux essais faits dans le laboratoire de LCTP Bouira sur les propriétés des bétons fibrés à base de deux types de fibres (fibre métallique de SIKA et déchet des fibres métalliques).

- Les différents bétons élaborés sont notés comme suit :
 - **B 0.5% F** : béton fibré avec 0.5% de fibre métallique de sika
 - **B 1% F** : béton fibré avec 1% de fibre métallique de sika
 - **B 2%F** : béton fibré avec 2% de fibre métallique de sika
 - **B 0.5%D F** : béton fibré avec 0.5% de déchet de fibre métallique
 - **B 1%D F** : béton fibré avec 1% de déchet de fibre métallique
 - **B 2% D F** : béton fibré avec 2% de déchet de fibre métallique

Le béton est formulé en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse. Comme toutes les méthodes classiques, la méthode de Dreux repose sur l'utilisation de courbes granulaires de référence. Elle permet d'approcher par le calcul ou par la construction géométrique les proportions optimales des différentes fractions granulaires. Les courbes de Dreux ont été obtenues de façon purement empirique, en collectant des données relatives à des bétons ayant donné satisfaction.

Les performances requises pour un béton impliquent:

- Une consistance adaptée à sa destination.
- Des qualités de résistance à différentes échéances, le plus souvent à 28 jours.
- Des qualités de durabilité qui conduisent à imposer un dosage minimum en ciment (C_{min}) Et un rapport E/C maximum (E/C) max.

IV.3.2. formulation et préparation des bétons

La méthode de formulations des bétons utilisés dans cette étude est celle de Dreux- Gorisse
La composition est calculée selon les données suivantes:

- Deux Types de béton : Béton fibré avec fibre métallique de Sika et béton fibré avec déchet métallique.
- Diamètre maximal des granulats $D_{max} = 20$ cm
- Les trois classes granulaires: 0/3,3/8 et 8/15

- Ouvrabilité du béton: plastique (Affaissement au cône d'Abrams, $Aff = 8 \pm 2$ cm), qui est le paramètre le plus important pour la mise en œuvre des bétons.
- Serrage: vibration courante (Table vibrante).
- Résistance caractéristique projetée à 28 jours pour tous les bétons $R_{C28} = 25$ MPa.
- Dosage en ciment des différents bétons est-il est de l'ordre de : 400 kg/m^3 .

IV.3.4. Composition des bétons formulés

IV.3.4.1. La formulation du béton utilisé au laboratoire

Les tableaux suivants présentent la composition granulaire des constituants du béton réalisé à l'aide de la méthode Dreux.

Tableau IV.14. Composition granulaire et quantité des constituants des bétons utilisés pour 9 éprouvette 15x15x15cm (Fibre Métallique).

	3 Eprouvettes (0.5%)	3 Eprouvettes (1%)	3 Eprouvettes (2%)
Fibre (g) sika	398	796	1592
Sable (g)	5540	5540	5540
Gravier 3/8 (g)	2580	2580	2580
Gravier 8/15 (g)	9820	9820	9820
Ciment (g)	4050	4050	4050
Eau (L)	2,190	2,190	2,190
Adjuvent (g)	28.35	28.35	28.35

Tableau IV.15. Composition granulaire et quantité des constituants des bétons utilisés pour 9 éprouvette 7x7x28cm (Fibre métallique)

	3 Eprouvettes (0.5%)	3 Eprouvettes (1%)	3 Eprouvettes (2%)
Fibre (g) sika	162	324	698
Sable (g)	2250	2250	2250
Gravier 3/8 (g)	1000	1000	1000
Gravier 8/15 (g)	4000	4000	4000
Ciment (g)	1650	1650	1650
Eau (L)	0.890	0.890	0.890
Adjuvent (g)	11.52	11.52	11.52

Tableau IV.16 Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés pour 9 éprouvettes 15x15x15cm (Déchet de Fibre).

	3 Eprouvettes (0.5%)	3 Eprouvettes (1%)	3 Eprouvettes (2%)
Déchet de Fibre (g)	398	796	1592
Sable (g)	5540	5540	5540
Gravier 3/8 (g)	2580	2580	2580
Gravier 8/15 (g)	9820	9820	9820
Ciment (g)	4050	4050	4050
Eau (L)	2,190	2,190	2,190
Adjuvent (g)	28.35	28.35	28.35

Tableau IV.17. Composition granulaire et quantité des constituions des bétons utilisés pour 9 éprouvette 7x7x28cm (Déchet de Fibre).

	3 Eprouvettes (0.5%)	3 Eprouvettes (1%)	3 Eprouvettes (2%)
Fibre (g) sika	162	324	698
Sable (g)	2250	2250	2250
Gravier 3/8 (g)	1000	1000	1000
Gravier 8/15 (g)	4000	4000	4000
Ciment (g)	1650	1650	1650
Eau (L)	0.890	0.890	0.890
Adjuvent (g)	11.52	11.52	11.52

IV.3.4.2. Malaxage du béton

La bétonnière utilisée est de type BALCO Top 1200 capacité 30 litres; on introduit d'abord les deux types de gravier puis le sable les malaxer ensuite le ciment un second tour de malaxage et en dernier l'eau de gâchage versée à plusieurs reprises avec le super plastifiant ; le malaxage dure 3 minutes.

**Figure IV.24.** Malaxeur du béton

IV.3.4.3. Préparation des moules

- **Moule de compression**

Le béton est mis en place dans des moules cubique 15x15x15cm, pour l'essai de la compression, ils sont conforme à la norme [AFNOR NF P18-400, p387] et [ACNOR CSN octobre 1994, CSA.A23.2-2C (P321) et CSA.A23.2-3C (P326), A23.2-ID (P81)], ils sont métalliques solides résistant à la déformation et vibration, réutilisables, avec des caractéristiques constantes pour chaque utilisation.

- **Moule d'éprouvette prismatique (flexion)**

Les moules pour les éprouvettes prismatiques 7x7x28cm égale à $axax4a$, ne figure pas dans la norme NF P18-400 mais elle permet leurs utilisation pour l'essai de flexion selon la norme NF P18-407, conformément à AFNOR 1990 et ACNOR 1994, CSA A23.2 (3C p326). Ces moules sont métalliques rigides, ne réagissent pas avec le béton ordinaire, ils résistent aux vibrations, aux déformations et réutilisable avec des caractéristiques constantes à chaque utilisation. Il est conseillé par AFNOR de vérifier la tolérance du moule (rectitude des génératrices, planéité, orthogonalité.)

Notre moule est conforme aux conditions exigées par la norme CSAI octobre 1994 :

- Dimension maximale de (b, a) > 3D ; avec D le grand diamètre.
- Le rapport b/a < 1,5
- La longueur L > 3a et L ~ 50mm

IV.3.5. Conservation des éprouvettes (selon la norme NF P18 438)

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et doivent être protégées contre les vibrations, les chocs, et la dessiccation pendant un minimum de 16h et un maximum 3 jour à la température de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Ces éprouvettes sont conservées dans une chambre humide à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et d'humidité relative au moins égale à 95 %, pendant 28 jours.



Figure IV.25. Conservation des éprouvettes dans une chambre humide.

IV.3.6. Méthodes de caractérisation

IV.3.6.1. Essai à l'état frais

IV.3.6.1.1. Essai d'Affaissement au cône d'Abrams (NF PI8 -451)

Pour chaque moitié de gâché, on mesure l'affaissement selon la norme CSA A23.2-5C et NF PI8 -451, on humidifier le cône d'Abrams (surface intérieur) préalablement, le béton est introduit à l'intérieur du cône en trois couches de même hauteur 7cm, et avec le bourroir on pique 25 fois chaque couche tout autour des coins vers le centre (le bourroir est vertical), il faut remplir la dernière couche avec excès, la pilonné puis la rasé. L'enlèvement du cône doit être vers le haut et à ne pas dépasser les 5 secondes.

Enfin l'affaissement A est la différence de hauteur entre le cône plein du béton et la hauteur de l'échantillon affaissé (le point le plus élevé); pour tous les essais l'affaissement est entre 3 et 15



Figure IV.26. Essai d'Affaissement au cône d'Abrams.

IV.3.6.1.3. Coulage du béton

La mise en place du béton dans le moule se fait en deux couches égales. Pour les éprouvettes Cubique et prismatiques on a utilisé une tige de piquage comme moyen de vibration lors de l'absence de la table, les 3 couches sont vibrées jusqu'à l'arrêt d'apparition des bulles d'air à la surface de moulage.



Figure IV.27. Coulage du béton.

IV.3.6.2. Essais à l'état durci

IV.3.6.2.1. Masse volumique durcie des bétons NF P 18-440

Les masses des bétons sont déterminées en suivant la norme NF P 18-440. Elles sont mesurées aux âges de 7, 14, 28 jours, la détermination est simple, il suffit de peser les éprouvettes de chaque série du béton puis prendre la moyenne des trois. La masse volumique est donnée par l'expression suivante :

$$M_v = M/V \text{ Avec :}$$

M : masse du béton durci

V : volume de l'éprouvette tel que $V = 15 \times 15 \times 15 \text{ cm} = 3375 \text{ cm}^3$.

IV.3.6.2.2. La résistance à la flexion (NF P 15-471)

La résistance à la traction par flexion des bétons a été évaluée par des essais de flexion trois points effectués sur des éprouvettes prismatique ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 .

$$R_f = \frac{1,5PL}{a^3}$$

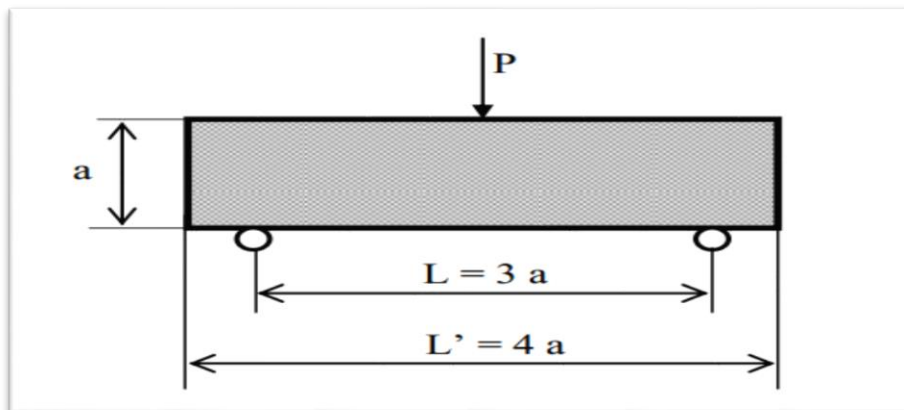


Figure IV.28. Essai de traction

R_f : est la résistance en flexion en MPa ;

a : est le côté de la section carrée de prisme en millimètres (mm) ;

P : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture en newtons (N) ;

L : est la distance entre les appuis en millimètres (mm)



Figure IV.29. Appareille de l'essai de traction.

IV.3.6.2.3. La résistance à la compression (NF EN 196-1)

L'essai de la compression s'effectue sur des différents types d'éprouvettes. On trouve des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et hauteur de 32 cm (16x32 cm) et même de 11x22 cm, on trouve aussi des éprouvettes cubiques de 15x15x15 cm comme les quelles on a utilisées dans notre travail.

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S} \quad (\text{III.7})$$

σ_c : Contrainte de compression

P_c : la charge de rupture à la compression.

S : Section transversale de l'éprouvette.



Figure IV.30. Appareille de l'essai de compression.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé tous les matériaux entrant dans la composition des bétons fibrés, la formulation des bétons est réalisée à l'aide de la méthode de DREUX GORRIS, les bétons obtenus sont caractérisés à l'état frais et durcis, dans le chapitre V nous allons présenter les différents résultats obtenus avec leurs interprétations.

Chapitre V

Matériaux et méthodes

V. Résultats et discussions

V.1. Le ciment

V.1.1. Début et fin de prise

Le tableau suivant représente les résultats de l'essai de prise.

Tableau V.18. Résultats d'essai de début et fin de prise du ciment.

Temps de début de prise	3h : 15mn
Temps de fin de prise	5

La figure V.31 représente le temps de fin et début de prise de ciment CEM II 42.5

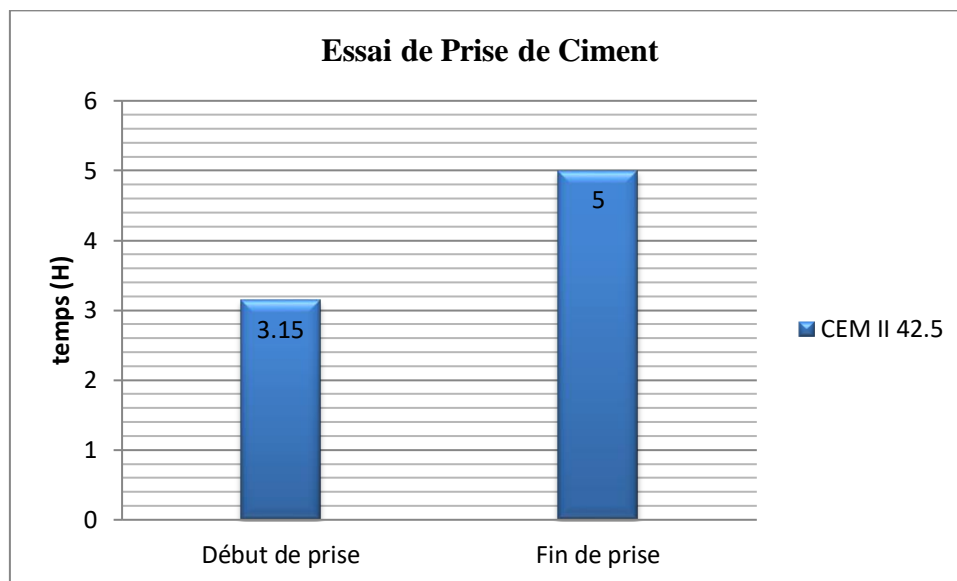


Figure V.31. Temps de fin et début de prise de ciment CEM II 42.5

V.1.1.1. Interprétation

Le temps de début de prise du ciment utilisé est de 3h15mn et le temps de fin de prise est de 5h, les résultats obtenus sont conformes à la fiche technique du ciment utilisé.

V.2. Les Granulats

V.2.1. Le sable

V.2.1.1. Analyse Granulométrique du sable

Le tableau suivant représente les résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/3 et la valeur du module de finesse de sable.

Tableau V.19. Résultats de l'analyse granulométrique du sable 0/3.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Mf
5	0	0	100	2,9
2.5	113	11.3	88.7	
1.25	454	45.4	54.6	
0.63	683	68.3	31.7	
0.315	825	82.5	17.5	
0,16	924	92.4	7.6	
0.063	991	99.1	0.9	
FOND	1000	100	0	

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau V.19 la valeur du module de finesse de sable est de 2,9, donc notre sable est classé dans les sables peu grossiers, mais qu'on peut utiliser pour la réalisation des bétons de bonne qualité.

V.2.1.2. Equivalent de sable

Les résultats obtenus pour l'essai d'équivalent de sable sont mentionnés sur le tableau V.20 suivant :

Tableau V.20. Les résultats d'essai d'équivalente de sable.

Equivalent de sable		Limite de valeur	Observation
ESV	65	$65\% < ESV < 75\%$	Sable légèrement argileux
ESP	70	$60 \leq ESP < 70\%$	

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau V.3 les valeurs de l'équivalent de sable visuel et avec piston sont respectivement de 65% et 70%, ces dernières entrent dans les fourchettes des sables légèrement argileux, de propreté admissible n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton, qu'on peut utiliser pour la fabrication des bétons de bonne qualité.

V.2.2. Gravier

V.2.2.1. Analyse Granulométrique

V.2.2.1.1. Analyse Granulométrique pour gravier 8/15

Les résultats de l'essai Granulométrique pour gravier 3/8 est représenté dans le tableau suivant :

Tableau 21. Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
10	3	0.15	100
8	8	0.55	99.45
6.3	236	11.8	88.2
5	907	45.35	54.65
2.5	1877	93.85	6.15
1.25	1987	98.9	1.1
0.315	1993	99.65	0.35
0.16	1994	99.7	0.3
0.063	1998	99.85	0.15
Fond	2000	100	0

V.2.2.1.2. Analyse Granulométrique pour gravier 8/15

Les résultats de l'essai Granulométrique pour gravier 3/8 est représenté dans le tableau suivant :

Tableau 22. Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
16	162	4.05	100
12.5	1372	34.4	65.5
10	2498	62.45	28.05
8	3466	86.65	13.35
6.3	3908	97.7	2.3
5	3981	99.53	0.47
2.5	3994	99.58	0.42
fond	4000	100	0

La courbe granulométrique des granulats est représentée dans la figure suivante

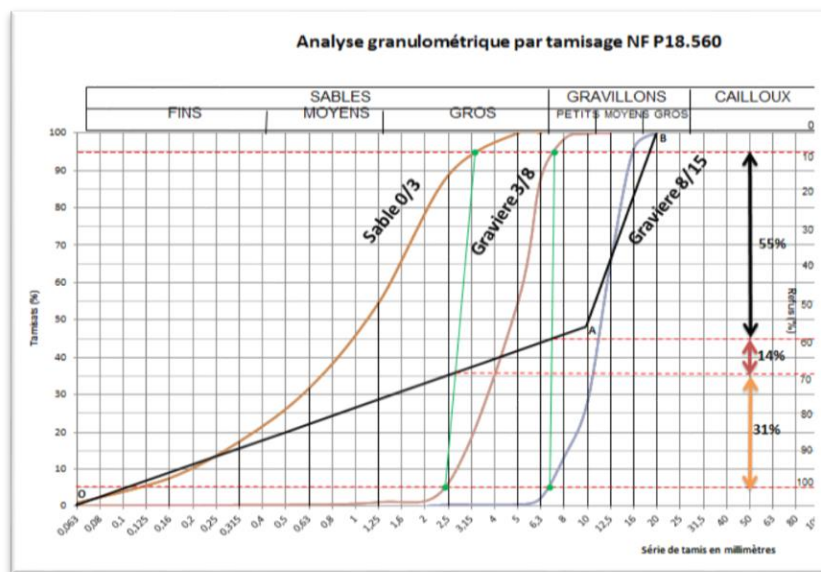


Figure V.32. Courbe granulométrique des granulats utilisés.

• **Interprétation**

D'après les résultats de la figure V.1 on remarque que les courbes granulométriques du sable et des graviers présentent une allure continue, donc toutes les fractions granulaires sont présentes dans les granulats.

V.2.2.2. Essai de Los Angeles

Le tableau suivant récapitule les résultats de Los Angeles pour les deux type de graviers utilisé dans notre formulation Gravier $3/8$ et Gravier $8/15$.

Tableau V.23. Résultats de l'essai de Los Angeles des graviers étudié

Matériaux	Classes granulaires				LA
		Initial (M)	Final (m')	< 1.6mm m = 5000-m'	
3/8	4-6.3	5000	3726	1274	25.48
8/15	10-14	5000	3908	1092	21.84

• **Interprétation**

Les résultats obtenus pour l'essai Los Angeles pour les deux type de graviers utilisés dans notre formulation (Gravier $3/8$ et Gravier $8/15$) respectivement 25,48 et 21,84, on constate que ces graviers peuvent être utilisé pour la réalisation des bétons de bonne qualité.

V.2.2.3. Masse Volumique des Granulats

Les résultats obtenus pour les trois Types de Granulats utilisé dans notre formulation sont représentés dans le tableau V.24.

Tableau V.24. Résultats des masses volumiques absolues des Granulats.

Echantillon		V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_s (g/ml)	ρ_s moyenne (g/ml)
0/3	1	150	179	2.58	2.58
	2	150	182	2.5	
	3	150	180	2.66	
3/8	1	150	180	2.66	2.6
	2	150	182	2.5	
	3	150	180	2.66	
8/15	1	150	182	2.5	2.6
	2	150	180	2.66	
	3	150	180	2.66	

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau V.24 on remarque les masses volumiques des granulats sont de 2,58 g/cm³ pour le sable et 2,6 g/cm³ pour les graviers (Gravier _{3/8} et Gravier_{8/15}) sont proche parce que sont issus de la même roche (même origine).

V.3. Essai sur béton à l'état frais

V.3.1. Essai d'Affaissement au cône d'Abrams

Les résultats obtenus pour l'essai d'Affaissement au cône d'Abrams sont présentés dans le tableau V.25

Tableau V.25. Résultats d'Affaissements des différents types de bétons

Essai	Type de béton	Affaissement moyen
D	B 0.5% DF	15 cm
E	B 1% DF	7 cm
F	B 2% DF	3.5 cm

La figure V.33 représente l'affaissements des Béton dosée de DFM

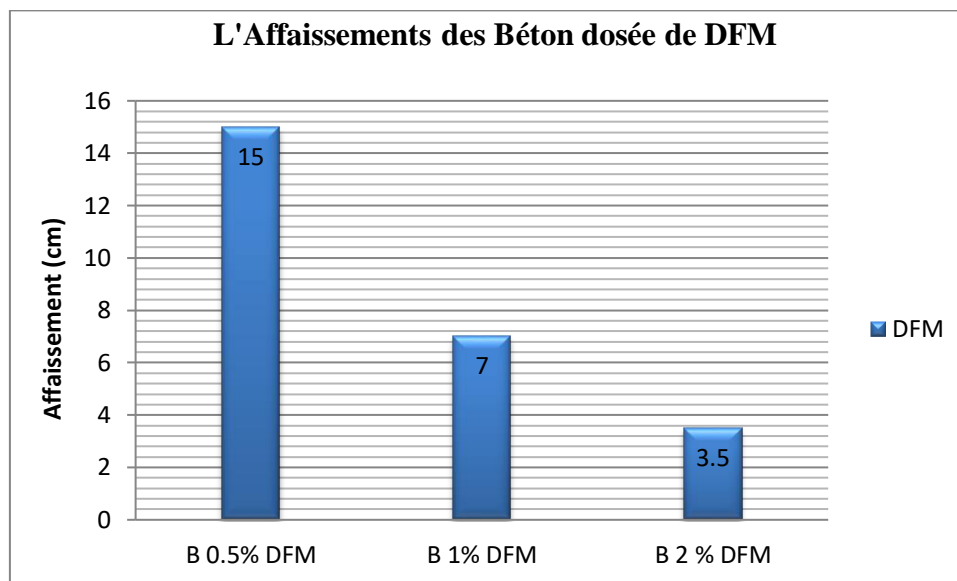


Figure V.33. L'affaissement des Béton dosé par le DFM.

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau V.8 on remarque que l'affaissement des bétons diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres recyclées.

V.4. Essai sur béton à l'état durci

V.4.1. Masse volumique durcie des bétons

Les résultats obtenus pour l'essai de Masse volumique durcie des bétons sont présentés dans le tableau V.26.

Tableau V.26. Résultats des masses volumiques des bétons à l'état durci.

Les masses volumiques moyennes des bétons durcis (g/cm^3)				
Type de béton	Eprouvette	Masse (g)	Volume (cm^3)	Masse Volumique (g/cm^3)
B+0.5% FM	15X15X15	7989	3375	2.37
B + 1% FM	15X15X15	8269	3375	2.45
B+2% FM	15X15X15	8433	3375	2.49
B+0.5% DFM	15X15X15	7970	3375	2.36
B+1% DFM	15X15X15	8320	3375	2.46
B+2% DFM	15X15X15	8460	3375	2.5

La figure V.34 représente les masses volumiques des bétons à l'état durci.

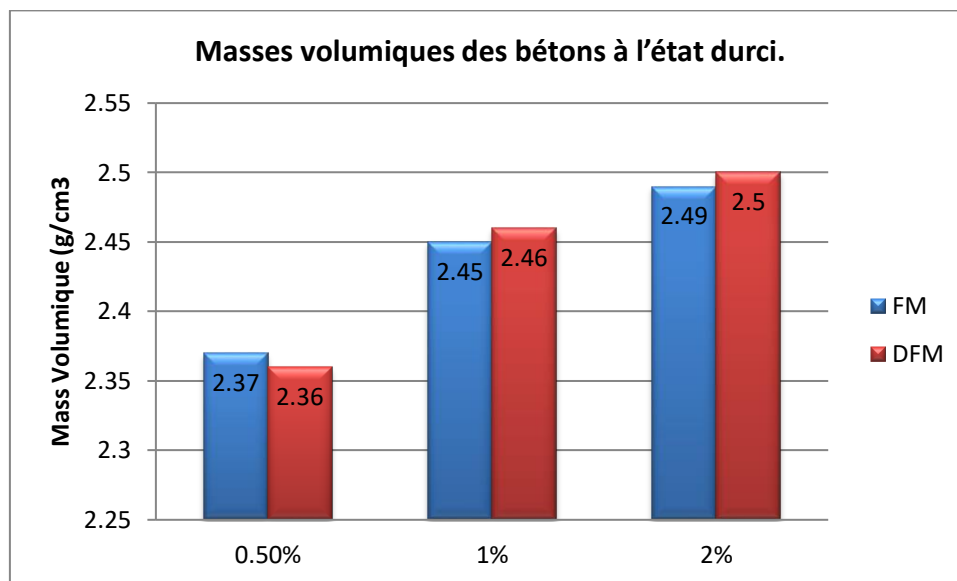


Figure V.34. Masses volumiques des bétons à l'état durci.

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau V.9 on remarque que la masse volumique des six types de béton augmente avec l'augmentation du pourcentage des deux types de fibres, la masse volumique des bétons est comprise entre 2,37 à 2,5 g/cm³, donc ces bétons sont classés comme des bétons normaux (masse volumique entre 2 à 3 g/cm³).

V.4.1 Essai de Compression

Les résultats obtenus pour l'essai de compression pour les éprouvettes cubiques de (15x15x15) cm³ sont représentés comme suit :

V.4.1.1 Essai de Compression Pour 0.5% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de compression pour un dosage de 0.5% de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.27. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 0.5% de Fibre Métallique

	0.5 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8,08	592.7	26.3
14 jrs	8.082	720.1	32
28 jrs	7.97	719.3	32

Tableau V.28. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 0.5% de Déchet Fibre Métallique.

	0.5 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8.012	585.3	26
14 jrs	8.13	660.1	27.5
28 jrs	7.989	750	33.3

La figure V.35 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 0.5 % de fibre en fonction de temps en jours.

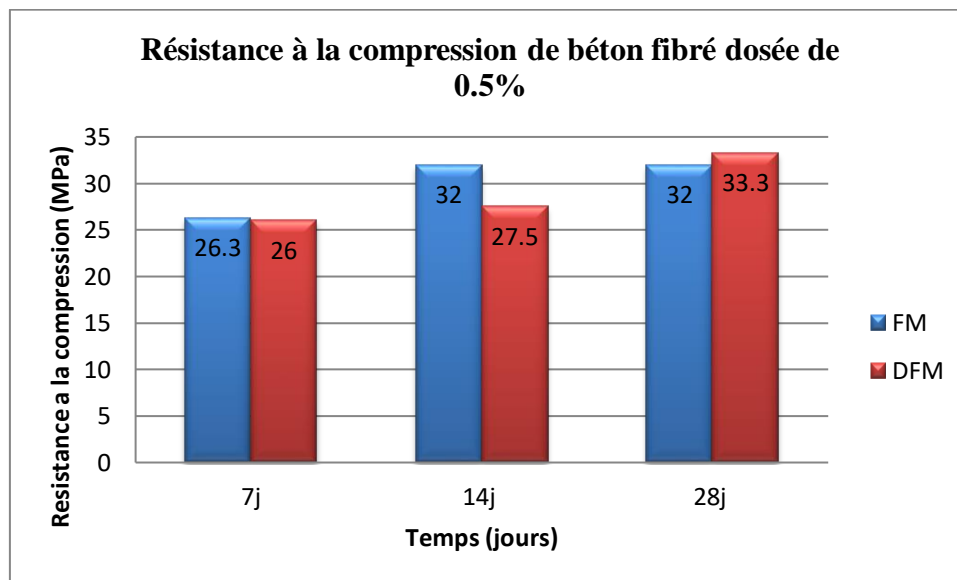


Figure V.35. Variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 0.5 % de fibre

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.10 et V.11 et la figure V.5 on remarque que la résistance à la compression du béton dosé avec 0,5% de fibres est proche pour les deux types de bétons (béton dosé avec des fibres de SIKA et DFM), ca peut être expliqué par la bonne homogénéité entre les fibres et la matrice cimentaire.

V.4.1.2 Essai de Compression Pour 1% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de compression pour un dosage de 1% de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.29. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 1% de Fibre Métallique

	1 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8.165	559.8	24.9
14 jrs	8.2	723.8	32.2
28 jrs	8.32	823.1	36.6

Tableau V.30. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 1% de Déchet Fibre Métallique

	1 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8.112	528.7	23.5
14 jrs	8.25	632.3	28.1
28 jrs	8.269	770.7	34.3

La figure V.6 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 1 % de fibre en fonction de temps en jours.

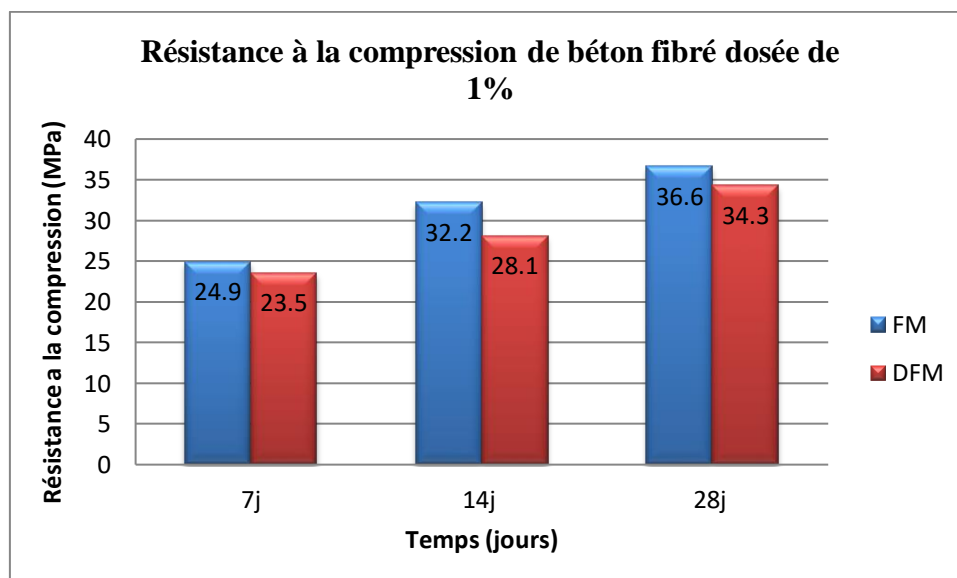


Figure V.36. Variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 1 % de fibre

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.12 et V.13 et la figure V.6 on remarque que la résistance à la compression du béton dosé avec 1% de fibres est proche pour les deux types de bétons (béton dosé avec des fibres de SIKA et DFM), ca peut être expliqué par la bonne homogénéité entre les fibres et la matrice cimentaire.

V.4.1.1 Essai de Compression Pour 2% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de compression pour un dosage de 2% de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.31. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 2% de Fibre Métallique

	2 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8.37	874.7	38.9
14 jrs	8.254	945	42.2
28 jrs	8.46	1029.7	45.8

Tableau V.32. Résultats de l'essai de compression pour un dosage de 2% de déchet Fibre Métallique

	2 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	8.393	641.4	28.5
14 jrs	8.41	692.3	30.8
28 jrs	8.433	770.7	34.3

La figure V.7 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 2 % de fibre en fonction de temps en jours.

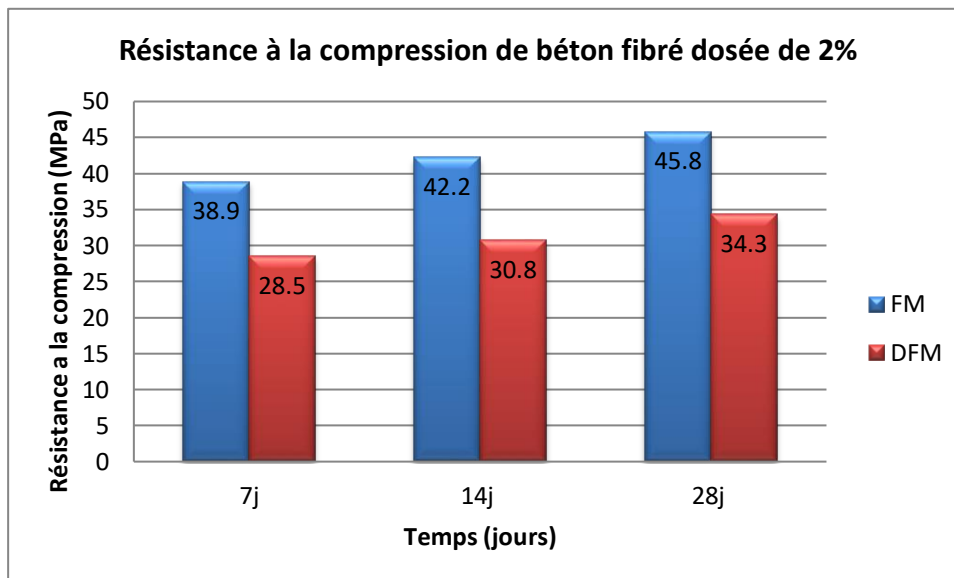


Figure V.37. Variation de la Résistance à la compression de béton dosé de 2 % de fibre

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.14 et V.15 et la figure V.7 on remarque que les valeurs de la résistance mécanique à la compression (7j, 14j et 28 jours) du béton dosé avec 2% sont différentes pour les deux types de bétons (béton dosé avec des fibres de SIKA et DFM), celles du béton à base des fibres de SIKA sont meilleures que celles du béton à base des déchets de fibres métalliques, ça peut être expliqué par les dimensions des fibres de SIKA, qui sont petites par rapport à celles des déchets de fibres métalliques qui permet d'avoir une bonne répartition des fibres dans le béton et par conséquent on obtient une bonne homogénéité entre les fibres et la matrice cimentaire et du fait une augmentation de la compacité et de la résistance mécanique à la compression (voir figures V.8 et V.9).



Figure V.38. Béton renforcé par les par déchets de fibres métalliques



Figure V.39. Béton renforcé les fibres de SIKA

Un autre facteur qui peut influencer sur l'adhérence entre les fibres (déchets de fibres) et la matrice cimentaire c'est la présence d'une couche en plastique autour des déchets de fibres métalliques qui influe sur la résistance mécanique du béton durcis (voir figures V.10 et V.11).



Figure V. 40. Fibre Métallique de SIKA



Figure V. 41. Déchet de Fibre Métallique

V.4.2 Essai de Flexion

Les résultats obtenus pour l'essai de Flexion pour des éprouvettes de 7x7x28cm sont représentés comme suit

V.4.2.1 Essai de Flexion Pour 0.5% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de Flexion pour un dosage de 0.5% de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 33. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 0.5 % de Fibre Métallique

	0.5 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.425	3.7	3.4
14 jrs	3.43	5.3	4
28 jrs	3.459	6.7	6.1

Tableau V. 34. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 0.5 % de déchet Fibre Métallique

	0.5 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.517	5.5	5
14 jrs	3.55	6.5	5.8
28 jrs	3.544	6.4	5.9

La figure V.12 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 0.5 % de fibre en fonction de temps en jours.

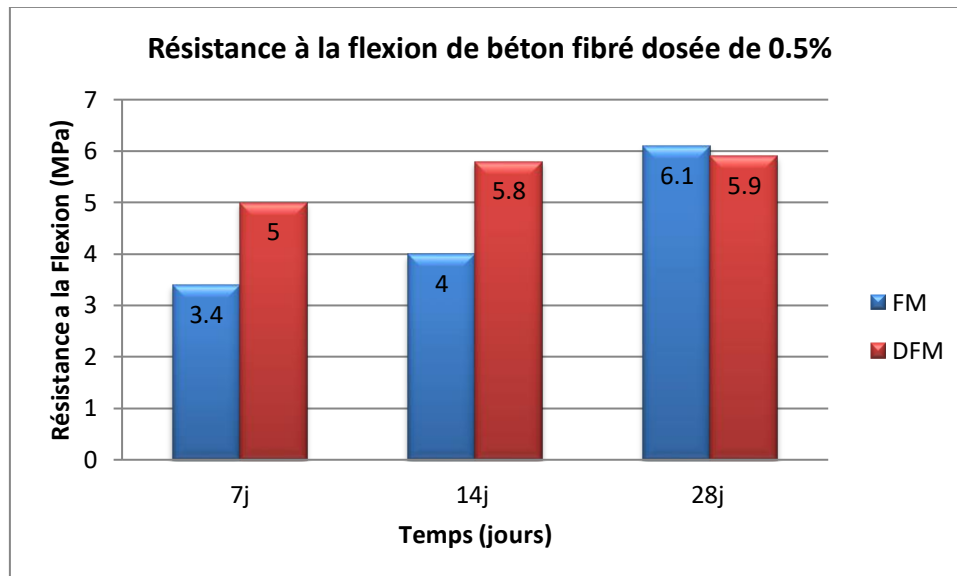


Figure V. 42. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 0.5 % de fibre

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.16 et V.17 et la figure V.12 on remarque que la résistance à la flexion du béton dosé avec 0,5% de fibres est proche pour les deux types de bétons (béton dosé avec des fibres de SIKA et DFM) surtout à 28 jours.

V.4.2.1 Essai de Flexion Pour 1% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de Flexion pour un dosage de 1 % de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.35. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 1 % de Fibre Métallique

	1 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.543	4.3	3.9
14 jrs	3.53	6.1	4.6
28 jrs	3.52	6.7	6.2

Tableau V. 36. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 1 % de déchet Fibre Métallique

	1 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.48	5.9	5.5
14 jrs	3.56	8	6.9
28 jrs	3.595	7.6	7.4

La figure V.13 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 1 % de fibre en fonction de temps en jours.

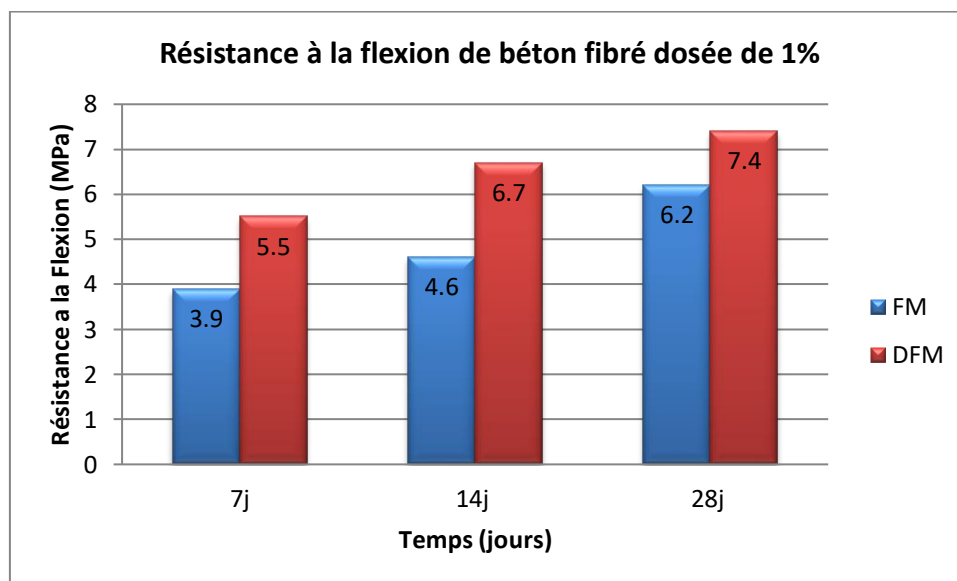


Figure V. 43. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 1 % de fibre

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.18 et V.19 et la figure V.13 on remarque que la résistance à la flexion du béton dosé avec 1% de fibres de déchets métallique est meilleure à celle du béton dosé avec 1% de fibres de SIKA à 7, 14 et 28 jours. Cela peut être expliqué par les dimensions des fibres DFM qui présentent une longueur de 50mm et une épaisseur de 1mm et une largeur de 2mm par rapport aux dimensions des fibres de SIKA qui sont de 30mm de longueur et 0,55mm de diamètre, la surface du contact entre les fibres et la matrice cimentaire est plus élevée dans le cas du béton renforcé par des fibres DFM, par conséquent la résistance à la flexion sera meilleure.

V.4.2.3 Essai de Flexion Pour 2% de Fibre

Les résultats obtenus pour l'essai de Flexion pour un dosage de 2 % de Fibre sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.37. Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 2 % de Fibre Métallique

	2 % De fibre Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.522	7.2	5.1
14 jrs	3.56	5.5	6.4
28 jrs	3.54	7	6.7

Tableau V. 38 Résultats de l'essai de flexion pour un dosage de 2 % de déchet Fibre Métallique

	2 % De fibre déchet Métallique		
	Mass (Kg)	Charge (KN)	Resistance (MPa)
7 jrs	3.534	6.5	5.9
14 jrs	3.63	8.5	7.8
28 jrs	3.634	8.6	7.9

La figure V.14 représente variation de la Resistance à la compression de béton dosé de 1 % de fibre en fonction de temps en jours.

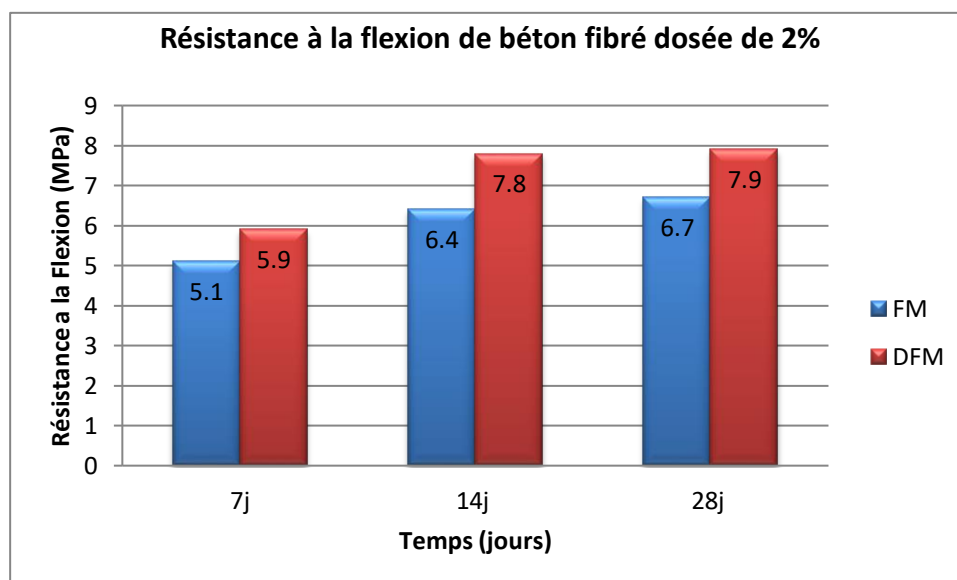


Figure V.44. Variation de la Resistance à la flexion de béton dosé de 2 % de fibre.

- **Interprétation**

D'après les résultats des tableaux V.18 et V.19 et la figure V.14 on remarque que la résistance à la flexion du béton dosé avec 2% de fibres de déchets métallique est meilleure à celle du béton dosé avec 2% de fibres de SIKA à 7, 14 et 28 jours. Cela peut être expliqué par la surface de contact entre les fibres et la matrice cimentaire et plus élevée dans le cas du béton renforcé par des fibres DFM, par conséquent la résistance à la flexion sera meilleure. L'augmentation du dosage en fibres est un paramètre qui influe sur la résistance mécanique à la flexion des bétons de fibres, cette dernière augmente avec l'augmentation du dosage des fibres. L'ouverture des fissures est importante dans le cas du béton renforcé par des fibres de SIKA (voir les figures V.15 et V.16)



Figure V.46. Béton renforcé par les déchets de fibres métalliques



Figure V.45. Béton renforcé par les fibres métallique de SIKA.

V.5. Conclusion

D'après les résultats de cette étude, nous pouvons faire les conclusions suivantes :

- L'utilisation des fibres dans le béton influe sur le comportement rhéologique de béton, à chaque fois que on augmente le dosage des fibres l'affaissement de béton diminue.
- Pour la résistance mécanique en compression les de type de fibres utiliser (Fibre métallique de SIKA et déchet de fibre métallique) donnent des résistances proches pour les dosages de 0.5 % et 1% des fibres, par contre pour un dosage de 2% des fibres on a remarqué qu'il y a une différence notable de résistance.
- Pour la résistance mécanique en flexion le béton renforcé par les déchets de fibres métallique donne une résistance meilleure à celle de béton renforcé par les fibres métallique de SIKA.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines en bâtiment et génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles. Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire porte essentiellement sur la valorisation des déchets pneumatique. Les déchets valorisés sont les fibres métalliques, ces derniers sont récupérés par le recyclage des pneus qui se trouve en très grandes quantités dans les différentes régions de l'Algérie.

Le but de ce travail est l'étude de l'effet d'ajout de ces deux types de fibres métalliques (fibres de SIKA et déchets de fibres métalliques) et de leurs dosages sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons fibrés.

Dans l'étude expérimentale nous avons formulé trois compositions du béton pour chaque type de fibres utilisés, en variant le pourcentage des deux types de fibres métallique FM et DFM de 0,5%, 1% et 2%. Les essais de traction par flexion et compression ont été réalisé afin, d'étudier l'effet de ces fibres sur les caractéristiques mécaniques.

D'après les résultats de l'étude expérimentale nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

➤ Les propriétés à l'état frais :

- L'utilisation des fibres dans le béton influe sur le comportement rhéologique de béton, à chaque fois qu'on augmente le dosage des fibres l'affaissement de béton diminue.

➤ Les propriétés à l'état durci :

- Pour la résistance mécanique en compression les deux types de fibres utilisé (Fibre métallique de SIKA et déchet de fibre métallique) donnent des résistances proches pour les dosages de 0,5 % et 1% des fibres, par contre pour un dosage de 2% des fibres on a remarqué qu'il y a une différence notable de résistance, c'est-à-dire le béton renforcé par fibres de SIKA donne des résistances mécaniques meilleures que celles du béton renforcé par des déchets de fibre métallique.
- Pour la résistance mécanique en flexion le béton renforcé par les déchets de fibres métallique donne une résistance meilleure à celle du béton renforcé par les fibres métalliques de SIKA.



Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] GHARIBI Wahiba, « Influence des fibres végétales sur le comportement des BAP sous environnement agressif », mémoire de Magister de Université Frères Mentouri-Contantine, 2015.
- [2] Nassah Dalila, « Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés », mémoire de Master UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES, 2017.
- [3] Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT, « La durabilité de béton », Collectif Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées (ENPC) (2eme édition), 2008.
- [4] Debih abdelmohcene, « Durabilité d'un béton exposé à un milieu agressive (acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulées), mémoire de Master de l'Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [5] Ben Boujemaa Kahina, Djerroud Mounia et Moussaoui Sabrina, « Influence des fibres métalliques (issues de l'unité BCR) sur le comportement mécanique et physico-chimique des mortiers ». Mémoire de Master de l'université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2013.
- [6] Festa Jean et Dreux Georges, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles (huitième édition), 1998, 416 pages.
- [7] S. KHERBACHE, K. MEHIDI, N. CHELOUAH, H. CHIKH-AMER et A. TAHAKOURT, « Etude de l'influence de l'ajout de particules fines contenues dans les sables concassés sur le retrait et la résistance des béton », Séminaire national de Génie Civil, Annaba 20-21 Novembre 2007.
- [8] Thibault Baste, Marc Bouffard, César Horlait, Rémi Lacroix, Simon Marcellin et Thibault Oliveira, « Projet IFIPS - S2 », 2008.
- [9] site internet : www.guidebeton.com/resistance-beton.
- [10] Xavier RÉGA, « Caractérisation du comportement en traction du béton sous fortes sollicitations », Thèse Doctorat de l'université d'Orléans, 2016.
- [11] Christophe Carde, Directeur technique du LERM, « Le retrait des béton », page 86 September /October 2006.
- [12] KOUICI ABIR, « Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des bétons auto plaçant (BAP) à l'état frais et durcis », mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [13] Taylor M., Lydon F.D. et Barr B.I.G. « Toughness measurements on steel fiber reinforced high strength concrete », Cement and Concrete Composites, 1997.

Références bibliographiques

- [14] Johnston C.D. (1996), « Proportioning, mixing and placement of fiber-reinforced cements and concretes », Production Methods and Workability of Concrete Proceedings of the International RILEM Conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, London.
- [15] CHANVILLARD G, (1993), « analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire », études et recherche des LPC, série ouvrages d'art.
- [16] DJELOUABI HAYET, « Influence des fibres végétales sur les propriétés physicomécaniques d'un béton », mémoire de Master Université M'HAMED BOUGARABOUMERDES, 2017.
- [17] P. Rossi, N. Harrouche et A. Belloc (1989), « Méthode de Composition des bétons de fibres métalliques », Annales de l'ITBTP, n° 475, pp. 38-43.
- [18] P. Casanova (1995), « Béton renforcé de fibres métalliques du matériau à la structure ». Thèse Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées Paris (France).
- [19] P. Rossi, N. Harrouche et A. Belloc (1989), « Méthode de Composition des bétons de fibres métalliques », Annales de l'ITBTP, n° 475, pp. 38-43.
- [20] R.N. Swang et P.S. Mangat (1974), « Compatibility of steel fiber reinforced concrete », Vol. 8, N°5, pp. 34-35.