



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algérienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par: GHERAIBIA Lamia

Sujet

Etude des caractéristiques mécaniques du béton avec l'ajout des fibres

Présenté et soutenu publiquement le 22/09/2020

Devant le jury composé de :

BENALI Redha

Université Larbi Tébessi -Tebessa

Président

NINOUH Tarek

Université Larbi Tébessi -Tebessa

Encadreur

BOURSACE Farid

Université Larbi Tébessi -Tebessa

Examineur

Promotion: 2019/2020

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie mon DIEU ALLAH, tout puissant, qui m'a donné la force, la patience, la volonté et le courage pour terminer ce travail.

La réalisation de ce mémoire n'a été possible que grâce au concours de certaines personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais, tout d'abord, adresser toute ma reconnaissance et mes remerciements à mon directeur de mémoire, le professeur **TAREK NINOUEH** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'adresse, également, mes sincères remerciements à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury de ma soutenance et d'examiner mon travail.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur le directeur du laboratoire LTPE.EST de Tébessa **ABDALLAH AHMED CHAOUEH** et tout le personnel technique, particulièrement, Monsieur **ELAID BOUKHELFA**, pour l'accueil qu'ils m'ont réservé et l'ambiance dans laquelle ce travail a été réalisé.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers tous mes enseignants du département de Génie civil, mes amis et mes collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Particulièrement mes parents pour leur soutien permanent, constant et surtout sans aucune faille ; avec la patience et la confiance qu'ils ont toujours placé en moi, ils m'ont permis d'avancer en toute quiétude. J'espère qu'ils trouveront en ce modeste travail une récompense de ce qu'ils ont fait pour moi.

Je dédie ce travail en signe de reconnaissance, à celui qui a lutté et sacrifié pour m'offrir les conditions propices à ma réussite : Mon mari

BELGHIT ISSAM

*Et en fin à ma petite fille **Baylassene Amat Errahmene**, à mon frère **Azize** , et aussi mes sœurs **Baraa** et **Ritedj**.*

Table des matières

Liste des tableaux	X
Liste des figures	xii
Liste des photos	xv
Liste des symboles	xvii
Introduction générale	1

Chapitre 1: Généralités sur le béton

1.1. Introduction.....	3
1.2. Historique.....	3
1.3. Définition.....	5
1.4. Composants du béton.....	5
1.4.1. Les Granulats.....	5
1.4.1.1. Dimensions des granulats.....	6
1.4.1.2. Gravier.....	6
1.4.1.3. Sable.....	7
1.4.2. Le ciment.....	8
1.4.3. L'eau de gâchage.....	10
1.4.4. Les adjuvants.....	10
1.5. Différents types du béton.....	12
1.5.1. Béton auto plaçant (BAP).....	12
1.5.2. Le béton à haute performance (BHP).....	12

1.5.3. Béton ordinaire.....	13
1.5.4. Béton de poudre réactive (BPR).....	13
1.5.5. Béton de fibre.....	13
1.5.6. Béton armé.....	13
1.5.7. Béton léger.....	14
1.5.8. Béton lourd.....	14
1.5.9. Béton préfabriqué.....	14
1.5.10. Béton compacté au rouleau (BCR).....	14
1.5.11. Béton réfractaire.....	14
1.5.12. Béton de terre.....	15
1.5.13. Béton à durcissement rapide.....	15
Conclusion.....	15

Chapitre II : Essais sur béton

II.1. Introduction	16
II.2. Caractéristique du béton frais.....	17
II.2.1. Essai d'étalement (Cône d'Abrams).....	17
II.2.2. Détermination de la masse volumique.....	18
II.2.3. Détermination de la teneur en air.....	18
II.3. Caractéristique du béton durci.....	18

II.3.1. Porosité.....	18
II.3.2. Résistances mécaniques.....	19
II.3.2.1. Essais de compression.....	22
II.3.2.2. Essais de traction par flexion.....	22
Conclusion.....	24

Chapitre III : Les fibres

III.1. Introduction.....	25
III.2. Définition des fibres.....	25
III.3. Différentes nature de fibres	25
III.3.1. Fibres naturelle.....	26
III.3.1.1. Fibres végétales.....	26
III.3.1.2. Fibres animales.....	26
III.3.1.3. Fibres minérales.....	27
III.3.1.4. Fibres organique.....	30
III.3.1.5. Fibres Métalliques.....	31
III.3.2. Fibres artificielles.....	33
III.3.2.1. Nylon.....	33
III.3.2.2. Polytoile.....	33
III.4. Propriétés des fibres.....	34
III.4.1. Notion de fibres structurales.....	34

III.4.2. Facteur d'élanement.....	34
III.4.3. Performance.....	35
III.4.4. Valeur de résistance résiduelle.....	35
III.4.5. Distribution des contraintes mécaniques.....	35
III.4.6. La résistance à l'abrasion.....	36
III.4.7. Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres.....	36
III.5. Choix du type des fibres.....	36
III.6. Rôle des fibres.....	37
Conclusion	39

Chapitre IV: Le béton fibré

IV.1. Introduction.....	40
IV.2. Définition de béton de fibres	40
IV.3. Utilisation des fibres dans le béton.....	42
IV.3.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques.....	42
IV.3.2. Contrôle de la fissuration de retrait.....	43
IV.4. Durabilité des bétons de fibres.....	43
IV.5. Avantages du béton fibré.....	46
IV.5.1. Aspect technique.....	46
IV.5.2. Aspect économique.....	47
IV.6. Domaines d'utilisation du béton de fibré.....	47
IV.7. Comportement mécanique des bétons de fibres.....	49
IV.7.1 Effet des fibres dans une matrice.....	49
IV.7.1.1 La taille et la rugosité des granulats.....	49

IV.7.1.2. Influence de l'adhérence fibres matrice.....	49
IV.7.1.3. Influence de la géométrie de la fibre.....	50
IV.7.1.4. Influence du type de fibres.....	50
IV.7.1.5. Influence du pourcentage en fibres.....	51
IV.7.1.6. Influence de la longueur des fibres.....	51
IV.7.2. La résistance mécanique.....	52
IV.7.2.1. Résistance des bétons de fibres en compression.....	52
IV.7.2.2. Résistance des bétons de fibres à la traction.....	52
Conclusion.....	53

Chapitre V : Etude expérimentale

V.1. Introduction.....	54
V.2. Matériaux utilisés.....	54
V.2.1. Sable.....	54
V.2.2 Ciment.....	54
V.2.3. Gravier.....	55
V.2.4. Eau de gâchage.....	55
V.3. Caractérisation des matériaux	55
V.3.1. Essais sur granulats.....	55
V.3.1.1. Analyse Granulométrique (NF P 18-560 septembre 1990).....	55
V.3.1.2. Masse volumique (NF P 94-064 Novembre 1993).....	61
V.3.1.3. Module de finesse de sable (norme NF P18-304).....	63

V.3.1.4. Equivalant de sable (NF P 18-598 Octobre 1991)	64
V.4. Formulation de béton.....	65
V.4.1. La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse.....	66
V.4.2. Les étapes de préparation des fibres métalliques.....	70
V.4.2.1. la forme plate (rectiligne).....	70
V.4.2.2. la forme ondulée (crêpée).....	71
V.4.2.3. Poids des fibres incorporées.....	73
V.4.3. Formulation des fibres.....	73
V.4.4. Préparation du béton.....	74
V.5. Les étapes de confection du béton.....	75
V.5.1. Conservation des éprouvettes avant le démoulage.....	75
V.5.2. Conservation après démoulage.....	76
V.6. Les essais sur le béton frais et durcis.....	77
V.6.1. Sur le béton frais.....	77
V.6.2. Sur le béton durci.....	78
V.6.2.1. Essai de compression.....	78
V.6.2.2. Essai de traction (essai brésilien).....	80
Conclusion.....	82

Chapitre VI : Interprétation des résultats

VI.1. Introduction.....	83
VI.2. Résultat.....	83
VI.2.1. Résistance à la compression	83

VI.2.2. Résistance à la traction.....	88
VI.3. Interprétation des résultats.....	93
VI.3.1. Essais de compression	93
VI.3.2. Essais de traction.....	93
Conclusion.....	94
Conclusion générale et perspective.....	97
Référence bibliographiques.....	99
Annexe.....	I

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité sur le béton

Tableau I.1 : Les granulats les plus utilisés.....	6
Tableau I.2 : Types de ciment.....	9
Tableau 1.3 : Classes de ciment.....	10

Chapitre III : Les fibres

Tableau III.1: Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante.....	28
Tableau III.2: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.....	29
Tableau III.3: Propriétés mécaniques des fibres de carbone.....	30
Tableau III.4: Propriétés mécaniques des fibres de polymère.....	31
Tableau III.5: Facteur d'élanement.....	35

Chapitre IV : Béton fibre

Tableau I.1: Domaines d'application privilégiés par type de fibres.....	47
Tableau IV.2: Intérêt apporté par domaines d'application.....	48

Chapitre V : Etude expérimentale

Tableau V.1: Analyses granulométriques du gravier 15/25.....	58
Tableau V.2: Analyses granulométriques du gravier 8/15.....	59
Tableau V.3: Analyses granulométriques du gravier 3/8.....	59
Tableau V.4: Analyses granulométriques du sable 0/3.....	60
Tableau V.5 : Les masses volumiques des matériaux employés.....	63
Tableau V.6 : Classification de la nature de sable en fonction d'E.S.....	65
Tableau V.7 : Correction sur le dosage en eau en fonction de D.....	67
Tableau V.8: Les pourcentages des granulats.....	69
Tableau V.9: Dosage pondérale des granulats kg/m.....	70
Tableau V.10: Dimension des fibres a bouts plats.....	72
Tableau V.11: Dimension des fibres ondulées.....	73
Tableau V.12: Poids des fibres par mètre cube du béton.....	73
Tableau V.13: Classement les affaissements du béton.....	78

Chapitre VI : Résultats et interprétation

Tableau VI.1: Caractéristiques mécaniques des bétons fibrés (fibres d'acier plats et ondulées) pourcentage de 1 % et 2 %.....	83
--	----

Tableau VI.2: Caractéristiques mécaniques des bétons fibrés (fibres d'acier plats et ondulées) pourcentage de 1 % et 2 %.....

Listes des figures

Chapitre I : Généralité sur le béton

Figure 1.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	4
Figure 1.2 : Les constituants du béton.....	5
Figure 1.3 : Les différents types de granulats.....	6
Figure 1.4 : Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment.....	11
Figure 1.5 : Utilisation des superplastifiants.....	12

Chapitre II : Essai sur béton

Figure II.1: Essai du Cône d'Abrams.....	17
Figure II.2 : Aéromètres à béton manuel ou électrique.....	18
Figure II.3: Diagramme de fluage et retrait.....	21
Figure II.4: Essai de la résistance à la compression.....	22
Figure II.5: Mesure de la résistance à la traction par flexion.....	23
Figure II.6: Scléromètre à béton électrique.....	23

Chapitre III : Les fibres

Figure III.1: Photos de quelques fibres végétales.....	26
Figure III.2 : Photos de quelques fibres animales.....	27
Figure III.3: Vue microscopique de fibres d'amiante.....	27
Figure III.4: Fibre de verre.....	28
Figure III.5: Fibres de carbone.....	29

Figure III.6: Géométrie des fibres métalliques.....	33
Figure III.7: Des fibres de polypropylène.....	34
Figure III.8 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	38

Chapitre IV: Béton fibre

Figure IV.1: Modèle de composite à base des fibres.....	41
Figure IV.2: Rôle des fibres dans la matrice de béton.....	42
Figure IV.3: Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibre.....	42
Figure IV.4: Texture d'un béton fibré.....	43
Figure IV.5: Exemple de fibres macro-synthétiques utilisées en protection Contre les incendies.....	45
Figure IV.6: Exemple de fibres métalliques.....	46
Figure IV.7: Fissuration dans le béton sans et avec fibres.....	46
Figure 1V.8: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.....	49
Figure 1V.9: Différentes forme de fibres.....	50
Figure 1V.10 : l'influence du pourcentage en fibres sur le comportement des éprouvettes.....	51
Figure 1V.11: Courbe contrainte déformation en compression simple (SERNAROS, 1984).....	52
Figure 1V.12 : courbe contrainte-déformation (BEKAERT1986).....	53

Chapitre V : Etude expérimentale

Figure V.1: Les Courbes granulométriques.....	60
Figure V.2 : Mesure de l'équivalent de sable	64

Figure V.3: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams).....	66
--	----

Figure V.4: Courbe granulaire de Dreux-Gorisse (dosage 350 kg).....	68
--	----

Figure V.5: Fibres en acier rectiligne.....	72
--	----

Figure V.6: Fibres en acier ondulées.....	72
--	----

Chapitre VI : Résultats et interprétation

Figure VI.1: Résistance à la compression du béton.(béton de référence).....	84
--	----

Figure VI.2: Résistance à la compression (BFP de 1 %).....	85
---	----

Figure VI.3: Résistance à la compression (BFP de 2 %).....	86
---	----

Figure VI.4: Résistance à la compression (BFO de 1 %).....	86
---	----

Figure VI.5 Résistance à la compression (BFO de 2 %).....	87
--	----

Figure VI.6 : Révolution de la résistance à la compression de béton de fibre en fonction de forme et de pourcentage.....	88
---	----

Figure VI.7: Résistance à la traction du béton (béton de référence).....	89
---	----

Figure VI.8: Résistance à la traction (BFP de 1 %).....	90
--	----

Figure VI.9: Résistance à la traction (BFP de 2 %).....	90
--	----

Figure VI.10: Résistance à la traction (BFO de 1 %).....	91
---	----

Figure VI.11: Résistance à la traction (BFO de 2 %).....	92
---	----

Figure VI.12 Révolution de la résistance à la traction de béton de fibre en fonction de forme et de pourcentage de fibres.....	92
---	----

Liste des photos

Chapitre V : Etude expérimentale

Photo V.1 :	Les matériaux utilisés.....	55
Photo V.2 :	Colonnes de tamis	57
Photo V.3 :	Mesure la masse volumique apparente	61
Photo V.4 :	Mesure la masse volumique absolue	62
Photo V.5 :	L'acier de fil d'attache.....	71
Photo V.6 :	Fibres coupées.....	71
Photo V.7 :	Plancher utilisé.....	71
Photo V.8 :	Fibre coupée avant l'ondulation.....	71
Photo V.9:	Fabrication des fibres ondulée.....	71
Photo V.10	Fibres ondulées.....	71
Photo V.11:	Séchage des échantillons dans l'étuve.....	74
Photo V.12:	Préparation de béton.....	74
Photo V.13:	Béton a des fibres métalliques.....	75
Photo V.14:	Les moules cylindriques (16×32) cm.....	75
Photo V.15:	Conservation des éprouvettes avant le démoulage.....	76
Photo V.16:	Démoulage des éprouvettes	76
Photo V.17:	Les éprouvettes dans le bassin d'eau	77
Photo V.18:	L'essai du cône d'Abrams	77
Photo V.19:	Machine de l'essai de compression.....	78
Photo V.20:	La mise en place dans la presse.....	79

Photo V.21: La rupture de l'éprouvette.....	80
Photo V.22: La mise en place de l'éprouvette dans la machine.....	81
Photo V.23 : La rupture de l'éprouvette.....	81

LISTE DES SYMBOLES

ASTM C1018 : norme pour déterminer le facteur de résistance résiduelle

ASTM C1399 : norme pour détermine la résistance résiduelle moyenne

B.R.F : Bétons renforcés de fibres

BAN : Béton autonivelant

BAP : Béton autoplaçant

BCR : Béton compacté au rouleau

BFM : Béton de fibre métallique

BFO : Béton de fibre ondulée

BFP : Béton de fibre plate

BHP : Béton à haute performance

BPR : Béton de poudre réactive

BT : Béton témoin

CPA : Ciment Portland Artificiel

E /C: Quantité d'eau/la quantité de ciment

ES : Equivalant de sable

FMO : Fibre métallique ondulée

FMP : Fibre métallique plate

HM : Fibre haut module

HR ou **HS** : Fibre haute résistance

JCI SF-4 : Détermine la résistance résiduelle équivalente

LTPE: Laboratoire de travaux publics de l'est

MF : Module de finesse de sable

PP : Polypropylène

PVC : Polychlorure de vinyle

R_{cj} : Résistance à la compression au jour

THR : Fibre hautes résistances

UHM : Fibre ultra haut module

VHS : Fibre Très haute résistance

Résumé

Le béton fibré est un matériau composé de fibres. Ces fibres, de composition diverse, permettent d'obtenir un béton amélioré qui peut être utilisé à de nombreux usages. Le principal avantage que présente le béton fibré par rapport au béton ordinaire est le remplacement partiel des armatures du ferrailage dans la composition des structures. Donc le but de l'incorporation de ces fibres dans le mélange du béton est de remplacer les armatures traditionnelles, ce qui augmente la résistance mécanique et facilite l'application du béton. De plus, les fibres ont aussi la capacité d'offrir au béton d'autres caractéristiques, telles que la résistance au feu. L'objectif de cette étude est l'évaluation de l'effet de deux formes géométriques des fibres métalliques (fibres plates et fibres ondulées), et en fonction des différents pourcentages de ces fibres, sur la résistance mécanique du béton (à la compression et à la traction). Un autre but du renforcement du béton avec des fibres est de diminuer plusieurs phénomènes: fissuration, retrait, et la fatigue. L'étude est basée sur des essais de compression et de traction effectués au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques afin d'évaluer l'influence de l'ajout des fibres métalliques sur le béton fibré. Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le renforcement du béton avec des fibres métalliques simples peuvent aussi contribuer à améliorer la résistance mécanique du béton pour un coût très faible.

Mots clés

Béton, fibre métallique, résistance mécanique.

ABSTRACT

Fiber-reinforced concrete is a material made up of fibers. These fibers, of varying composition, result in improved concrete that can be used for many purposes. The main advantage of fiber-reinforced concrete over ordinary concrete is the partial replacement of reinforcing bars in the composition of structures. Therefore, the purpose of incorporating these fibers into the mixture of concrete was to replace traditional reinforcement, which increases the mechanical strength and facilitates the application of concrete. In addition, fibers also have the ability to provide concrete with other characteristics, such as fire resistance. The objective of this study is the evaluation of the effect of two geometric shapes of metal fibers (flat fibers and corrugated fibers), and according to the different percentages of these fibers, on the mechanical resistance of concrete (to compression and traction). Another purpose of reinforcing concrete with fibers is to reduce several phenomena: cracking, shrinkage, and fatigue. The study is based on compression and tensile tests carried out in the laboratory on cylindrical specimens in order to evaluate the influence of the addition of metal fibers on the fiber-reinforced concrete. The results obtained in this study demonstrate that the reinforcement of concrete with simple metal fibers can also contribute to improve the mechanical strength of concrete a very low cost.

Keywords

Concrete, metallic fiber, mechanical strength

ملخص

الخرسانة المسلحة بالألياف عبارة عن مادة مكونة من ألياف، وهذه الألياف ذات التركيبات المتنوعة تجعل من الممكن الحصول على خرسانة محسنة يمكن استخدامها في العديد من الاستخدامات. تتمثل الميزة الرئيسية للخرسانة المسلحة بالألياف على الخرسانة العادية في الاستبدال الجزئي لتقوية التسليح في تكوين الهياكل. لذلك فإن الغرض من دمج هذه الألياف في الخلطة الخرسانية هو استبدال التعزيزات التقليدية مما يزيد من المقاومة الميكانيكية و يسهل تطبيق الخرسانة. بالإضافة الى ذلك تتمتع الألياف أيضا بالقدرة على تقديم خصائص اخرى ملموسة، مثل مقاومة الحريق.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير شكلين هندسيين للألياف المعدنية (الألياف المسطحة والألياف المموجة) وحسب النسب المئوية المختلفة لهذه الألياف، على المقاومة الميكانيكية للخرسانة (للضغط و المد).الهدف الاخر من تدعيم الخرسانة بالألياف هو تقليل العديد من الظواهر:

التشقق و الانكماش و التعب.تعتمد الدراسة على اختبارات الضغط والشد التي اجريت في المختبر على عينات اسطوانية من اجل تقييم تأثير اضافة الألياف المعدنية على الخرسانة المسلحة بالألياف.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة ان تدعيم الخرسانة بألياف معدنية بسيطة يمكن ان يساهم ايضا في تحسين المقاومة الميكانيكية للخرسانة بتكلفة منخفضة جدا.

الكلمات المفتاحية

الخرسانة ، الألياف المعدنية ، المقاومة الميكانيكية .

Introduction Générale

Introduction Générale

Le béton est de nos jours le matériau le plus utilisé au monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Il présente une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, mais sa faible résistance en traction, sa fragilité et son aptitude à la microfissuration, alors qu'il doit être renforcé dans la majorité de ces applications. Pour cela on améliore ces caractéristiques par l'introduction de différents types de fibre.

L'intérêt des fibres est d'agir comme des armatures à l'intérieur du béton, en permettant de diminuer le risque de fissuration et d'augmenter la résistance mécanique. Les fibres les plus couramment utilisées dans le domaine de génie civil sont les fibres métalliques. Elles sont très efficaces par la diminution (faibles ouvertures) ou l'élimination des fissures, mais ne permettent pas de reprendre en ultime des efforts aussi importants que les armatures.

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'effet de l'emploi des fibres métalliques dans le béton. Des essais de laboratoire ont été effectués sur des éprouvettes de référence et des éprouvettes améliorées par des fibres métalliques. Ces éprouvettes ont été renforcées avec des différents pourcentages de fibres qui ont deux formes géométriques, mais avec même composition du béton.

Le mémoire est composé de six chapitres qui décrivent les outils et les matériaux utilisés et les résultats obtenus.

Le premier chapitre est, consacré à une étude bibliographique sur le béton et ses compositions.

Le deuxième chapitre présente les essais les plus utilisés pour évaluer les caractéristiques du béton.

Le troisième chapitre, fournit à une présentation de différentes fibres utilisées pour améliorer les caractéristiques du béton.

Le quatrième chapitre, est, essentiellement, dédié à la définition, domaines d'utilisation et durabilité de béton de fibres.

Le cinquième chapitre est, entièrement consacré, à une étude expérimentale sur un nombre important d'éprouvettes de béton. En commençant ce chapitre par la partie d'identification

des matériaux et la détermination de différentes caractéristiques des matériaux utilisés puis on a présenté la formulation adoptée pour la préparation des bétons.

Le dernier chapitre présente l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans cette recherche.

Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus, et les perspectives pour la poursuite de ce travail.

Chapitre I
Généralités sur le
béton

Généralités sur le béton

I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction composé de matériaux de nature généralement minérale : granulats, sable, et d'eau aggloméré par un liant hydraulique (le plus souvent du ciment) qui sert de « colle ».

Plus de quatre milliards de mètres cubes de béton sont coulés chaque année dans le monde. Ce matériau permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires ainsi que des plates-formes d'exploitation pétrolière off shore.

Le développement de l'emploi d'un matériau de construction repose sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité du matériau fondent les principaux critères de choix techniques. La disponibilité et le faible coût des matières premières, la facilité d'emploi et le prix de revient du matériau valident les conditions économiques [1].

I.2. Historique

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19ème siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [2].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature

inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20ème siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ces techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculants et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams (Figure 1.1.) varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplaçants.

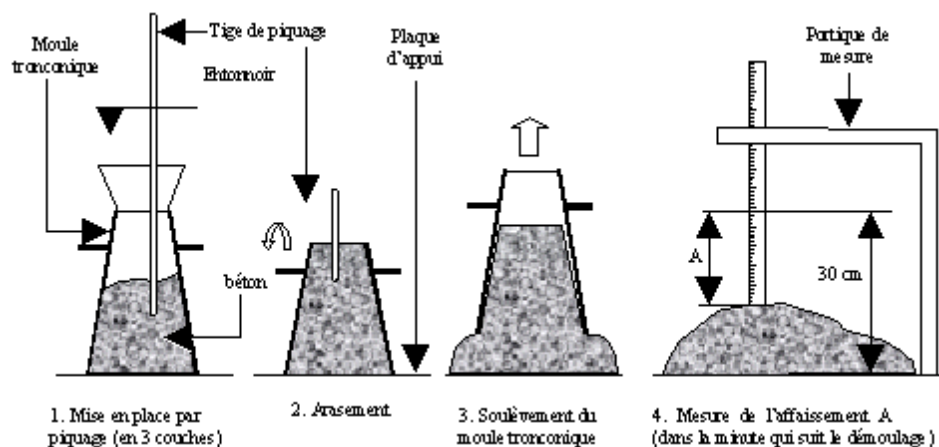


Figure I.1 Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [24]

De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs récurrents à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués.

Aujourd'hui constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplaçants. L'étude du matériau n'est plus, seulement, gouvernée par l'amélioration de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration et qui sont devenues

prioritaires. Ces bétons ont été, initialement, mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [3].

Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plates-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts.

I.3. Définition

Le béton est un mélange d'un squelette granulaire (Granulats+Sable) d'une part, et d'une pâte liante (Ciment+eau+adjuvants+ajouts éventuels), d'autre part, ce qui fait du béton un matériau hétérogène. Cette hétérogénéité est d'ordre : mécanique (dureté des granulats différente de celle de la pâte), chimique (retrait chimique empêché par le squelette granulaire) et thermique (dilatation thermique des granulats différente de celle de la pâte) [4].

I.4. Composants du béton



Figure I.2 Les constituants du béton

I.4.1. Granulats

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le 1er

économique : diminution de la quantité de liant (ciment et addition); et le 2^{ème} technique : limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment). Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les dimensions soulignées sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2) [5].



Figure I.3 Les différents types de granulats [6]

I.4.1.1. Dimensions des granulats

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Les granulats sont désignés par le couple d/D.

Tableau I.1 Les granulats les plus utilisés [6]

Les granulats les plus utilisés		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fines	0/D	$D < 2\text{mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm
Sablon	0/D	$D < 1\text{ mm}$ avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$1 < D \leq 6,3\text{ mm}$
Graves	0/D	$D > 6,3\text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 1\text{ mm}$ et $D \leq 125\text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d = 20\text{ mm}$ et $D \leq 50\text{ mm}$

I.4.1.2. Gravier

Les matériaux les plus usuels pour les mortiers et bétons sont d'origine alluvionnaire (dits roulés), semi-concassés ou concassés obtenus à partir de roches massives.

Les gravillons 5,6/20 qui sont les plus usuels ont une granulométrie adaptée à la composition des bétons. Les tout-venants de rivière ou de carrière possèdent ou trop ou pas assez d'éléments fins (sables), ce qui les rend impropres à l'usage pour des bétons en élévation.

De même que pour les sables, les gravillons doivent être propres. Ils ne doivent contenir ni argile, ni matières terreuses, ni poussières provenant du concassage. En effet, si la surface des gravillons est sale, l'adhérence avec les cristaux hydratés du ciment est mauvaise [7].

I.4.1.3. Sable

Un sable de bonne granulométrie doit contenir à la fois des grains fins, moyens et gros. Les sables très fins, de dunes ou marins sont à éviter.

Les sables doivent être propres. La propreté est fournie par l'essai d'équivalent de sable (norme NF EN 933-8) [7].

a- Sables naturels [8]

- **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.

- **sable de dune**

Le sable de dune 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.

- **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 quartzueux sans matières terreuses ou argileuses, sont excellents pour les maçonneries.

b- 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, à 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 l'ALGERIE (ANNABA), également dans le reste du pays pour la confection d'assises de chaussée stabilisées.

I.4.2. Le Ciment

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450 °C. Broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau il s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du ciment portland sont [9] :

- Les silicates tricalciques (alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C3S]
- Les silicates bis calciques (bélitre) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C2S]
- Les aluminates tris calciques : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C3A]
- Les aluminoferrites tétra calciques : $4\text{CaO} \cdot \text{AlO}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C4AF]
- Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .).
- Les silicates de calcium C3S et C2S représentent à peu près 75 % de la masse du ciment.

Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre 4000 cm²/g et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

Le ciment peut être classé comme suit:

- Selon sa composition:

Le teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en types principaux à savoir

Tableau I.2 Types de ciment [10]

Types de ciment	Notation	% Clinker(K) (y compris le gypse)	% Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment portland	CPA-CEM I	95-100	-	0-5
Ciment portland composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20	-
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35	-
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	0-5
Ciment pouzzolanique	CPZ- CEM IV/A	65-90	10-35	0-5
	CPZ- CEM IV/B	45-64	36-55	0-5
Ciment aux laitiers et aux cendres	CLC- CEM V/A	40-64	18-30	0-5
	CLC- CEM V/B	20-39	31-50	0-5

- Selon ses résistances à la compression :

La norme NF EN 197-1, classe les ciments courants d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 1961, mesurée à 28 jours selon le (tableau I.3).

Tableau 1.3 Classes de ciment [25]

Valeurs limites de résistance à la compression			
Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa		
	2 jours	7 jours	28 jours
32,5 L	–	10	30
32,5 N	–	14	30
32,5 R	8	–	30
42,5 L	-	14	40
42,5 N	8	–	40
42,5 R	18	–	40
52,5 L	8	–	50
52,5 N	18	–	50
52,5 R	28	–	50

Selon le type d'environnement: Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux.

I.4.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton, l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées [11].

I.4.4. Les 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 permettant d'améliorer certains de ses propriétés [12].

Ils fournissent au formulateur 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'adjuvant qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les

superplastifiants. 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 moléculaires 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 [13].

Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau (Figure 1.4).

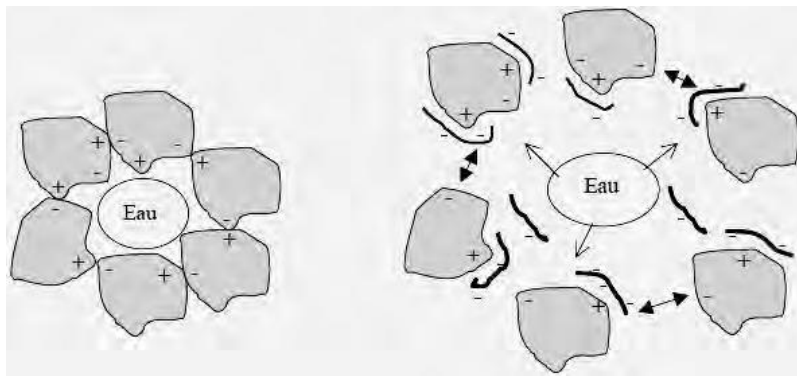


Figure I.4 Action des superplastifiants-Défloculation des grains de ciment

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la figure 1.4, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces (Figure 1.4).

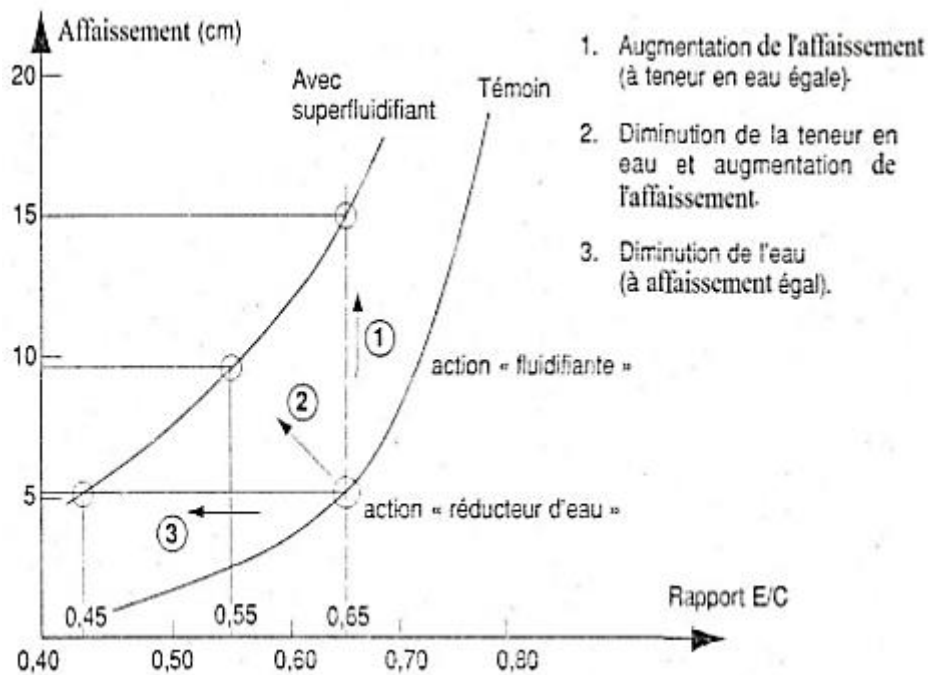


Figure I.5 Utilisation des superplastifiants [14]

I.5. Différents types du béton

Le matériau, fait l'exception pour le remplacer dans la construction ; techniquement et économiquement. Nous assistons à différents types de béton d'où :

I.5.1. Béton auto plaçant (BAP)

Un béton auto plaçant est un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectuent par le seul effet gravitaire) et conférant à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration [15].

I.5.2. Le béton à haute performance (BHP)

Le béton à haute performance se caractérisent par une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 40 MPa sur cylindre; un rapport eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs [16].

I.5.3. Béton ordinaire

Le béton ordinaire est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2500 Kg/m³. Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints.

Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage [17].

I.5.4. Béton de poudre réactive (BPR)

Le béton de poudre réactive est un matériau à matrice cimentaire pour lequel le nombre, la nature, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires ont été optimisés afin d'obtenir des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée.

La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré- ou post-tension [18].

I.5.5. Béton de fibre

Les bétons de fibre sont des bétons dans lesquels ont été incorporées des fibres de nature, dimension et géométrie diverses, dans le but de leur conférer certaines propriétés. De façon générale, ces bétons présentent : une meilleure résistance à la traction, une amélioration des résistances mécaniques (jeune âge, chocs, cisaillement, usure, abrasion...), une bonne maîtrise de la fissuration, une amélioration en matière de plasticité, de moulage et d'aspect de surface [19].

I.5.6. Béton armé

Le béton armé associe intimement un béton avec des armatures métalliques pour obtenir un matériau qui cumule les qualités de résistance en compression et en traction.

- Il allie la résistance à la compression du béton à la résistance à la traction de l'acier.
- Le choix des éléments d'armature, leur ancrage et leur répartition dans le béton est capitale.
- Un enrobage soigné des armatures est nécessaire pour les préserver des phénomènes d'oxydation [19].

I.5.7. Béton léger

Les bétons légers offrent une densité très inférieure à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Pour certains bétons légers, elle peut descendre jusqu'à des densités voisines de 0,4kg/m³.

La résistance d'un béton léger est très inférieure à celle d'un béton traditionnel. Pour les densités les plus basses, il ne peut être question de béton "structurel" mais seulement de béton de « remplissage ». Ces bétons légers possèdent un pouvoir isolant sur le plan thermique et acoustique [19].

I.5.8. Béton lourd

Les bétons lourds possèdent une masse volumique supérieure à 3000 kg/m³ contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Les bétons lourds permettent la réalisation d'ouvrages de protection contre les radiations (rayons X, gamma et autres rayons radioactifs) ou la réalisation de culées et de contrepoids [19].

I.5.9. Béton préfabriqué

La fabrication du béton préfabriqué est une solution technique qui consiste à fabriquer à l'avance des produits (éléments de construction), généralement, en grand nombre répétitif soit en usine ou sur chantier pour être montés sur place par la suite [20].

I.5.10. Béton compacté au rouleau (BCR)

Essentiellement les mêmes composants de béton comme les autres, mais avec des rapports différents, avec un remplacement partiel du ciment par des cendres volantes et beaucoup moins d'eau. Le mélange est très sec et a 0 de marasme, qui rend plus difficile le mélange. Il exige des cycles de mélange prolongés et des types de malaxeurs plus puissants et robustes pour pouvoir être utilisés [21].

I.5.11. Béton réfractaire

Le béton réfractaire sont des bétons pouvant résister à des températures très élevées (allant jusqu'à 1800 °C). Les bétons réfractaires peuvent généralement être utilisés dans le milieu industriel pour créer des revêtements homogènes pour tous les types de fours ou de cheminées [22].

I.5.12. Béton de terre

Le béton de terre est un matériau de construction à base de terre crue argileuse, traditionnellement connu sous les termes de pisé ou de torchis [23].

I.5.13. Béton à durcissement rapide

La rapidité de prise et de durcissement exceptionnelle permet de sécuriser rapidement (entre 15 et 90 minutes selon le dosage du mortier et le temps de début de prise choisis) les ouvrages par rapport aux intempéries, au froid et à la remise en service rapide [24].

Conclusion

Le béton est un matériau formé par un mélange de ciment, de sable, de gravillon et d'eau, et éventuellement d'adjuvants et d'additions, chacun de ces constituants joue un rôle différent dans le comportement de béton frais, pendant la prise et le durcissement.

Dans ce chapitre nous avons montré que les qualités d'un béton dépendent des caractéristiques de leurs constituants, en particulier, les granulats qui occupent environ 75% du volume total du béton. Ainsi que l'influence de dosage de ciment, l'eau et les adjuvants sur la qualité de béton restent primordiales et pour cela on l'étudie dans le chapitre suivant les essais mécaniques.

Chapitre II

Essais sur béton

Essais sur béton

II.1. Introduction

Le béton est matériau composite, c'est-à-dire fabriqué à partir de l'assemblage de granulats, de ciment, d'eau et d'adjuvants. Donner des propriétés de résistance ou de durabilité d'un béton ne s'improvise pas. Il est impératif de faire contrôler en laboratoire sa formulation afin d'anticiper son évolution sous contrainte et dans le temps.

Pour déterminer les différentes propriétés du béton, on étudie ses caractéristiques en laboratoire, en fonction de sa composition. En effet, le béton à destination d'un pont, par exemple, ne disposera pas des mêmes propriétés qu'un béton à destination d'une habitation. On doit donc être capable de "tester" chaque formulation de béton, pour en déterminer les particularités techniques.

On distingue trois grandes familles d'essais sur béton :

a- Les essais sur béton frais

Ils servent à déterminer les caractéristiques physiques du béton :

- Essai d'étalement (Cône d'Abrams) ;
- Détermination de la masse volumique ;
- Détermination de la teneur en air.

b - Les essais mécaniques

Ils servent à déterminer les caractéristiques de résistance aux efforts du béton :

- Résistance à la compression;
- Résistance à la traction;
- Résistance à la flexion ;
- Détermination du module d'élasticité statique;
- Coefficient de Poisson;
- Essai de fluage.

c - Les essais de durabilité

Ils servent à déterminer les caractéristiques de résistance à l'usure du temps du béton :

- Résistance au gel;
- Dilatation thermique;
- Perméabilité à l'eau et à l'air;

- Carbonatation accélérée;
- Réaction vis à vis de l'alcali-réaction;
- Réaction sulfatique.

II.2. Caractéristiques du béton frais

Le béton est appelé béton frais tant qu'il est possible de le mettre en œuvre. Passé le stade de la prise, il évolue vers le béton durci. Le passage du béton frais au béton durci est caractérisé par deux phases successives, l'une passant progressivement à l'autre: la phase du béton dit «rigidifié» et la phase du béton dit «de jeune âge».

Le béton frais, mis en place, compacté et en train de se raidir, est nommé béton «rigidifié». La résistance du béton rigidifié résulte, essentiellement, des forces d'adhérence entre l'eau et les particules solides ainsi que du frottement interne et de l'enchevêtrement du granulat. Au fur et à mesure de la progression de l'hydratation du ciment et du durcissement, le béton «rigidifié» passe au béton «jeune». Le béton jeune n'est plus ouvrable en raison de son état solidifié [26]. La consistance du béton frais détermine l'ouvrabilité du béton. Elle décrit non seulement la cohésion interne du béton frais, mais aussi d'importantes propriétés telles que le comportement à l'écoulement, la tendance à la ségrégation et l'aptitude au lissage. La consistance du béton frais a une influence primordiale sur la facilité de transbordement, de mise en place et de compactage sur le chantier. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton [27].

II.2.1. Essai d'étalement (Cône d'Abrams).

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance. La mesure de la consistance peut être effectuée, facilement, sur chantier pour déterminer l'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique [24].

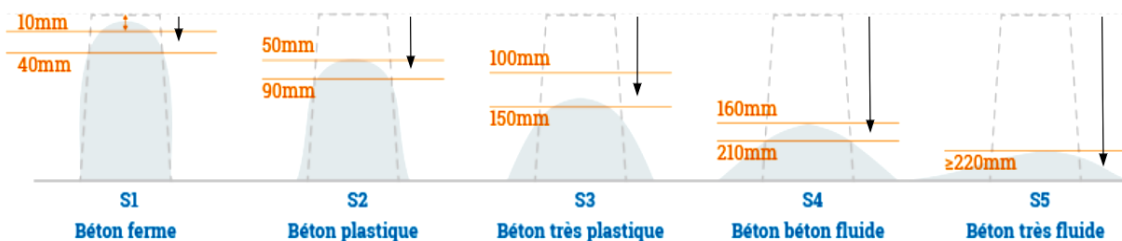


Figure II.1 Essai du Cône d'Abrams [26]

II.2.2. Détermination de la masse volumique

Le béton frais est mis en place dans un récipient rigide et étanche à l'eau, soient m_1 sa masse et V son volume. Le béton dans le récipient est ensuite pesé, soit m_2 sa masse. La masse volumique du béton frais est donc donnée par la relation :

$$\rho = (m_2 - m_1)/V$$

II.2.3. Détermination de la teneur en air

Deux méthodes alternatives sont possibles :

- La méthode de la colonne d'eau ;
- La méthode du manomètre.

Pour les deux méthodes, il convient de nettoyer soigneusement les rebords du récipient et du couvercle et de s'assurer de la bonne étanchéité sous pression entre le couvercle et le récipient. L'essai sera ensuite réalisé conformément à la norme et le résultat exprimé en % arrondi à 0,1 % près. Ces essais ne sont pas significatifs pour des bétons d'affaissement nul et les bétons réalisés avec des granulats poreux ou légers.



Figure II.2 Aéromètres à béton manuel ou électrique [28]

II.3. Caractéristiques du béton durci

II.3.1. Porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité – rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret (début du XX^{ème} siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance.

L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

La recherche d'une porosité minimale doit, nécessairement, passer par :

- l'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent jamais 0,850 : dans 1 m³ de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants, il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires) ;
- l'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité ; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires.

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau.

La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité :

- Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins ;
- Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion.

L'acier est en effet protégé contre son oxydation tant qu'il est dans un milieu de pH basique ; or, l'hydratation du ciment produit, suffisamment, de chaux pour créer ce milieu basique. En revanche, si cette chaux est mise en contact avec le gaz carbonique de l'air, elle se carbonate pour former du carbonate de calcium CaCO₃ de pH acide.

La diffusion de l'air dans les capillaires du béton sera d'autant plus lente que le béton présente une faible porosité retardant ainsi sa carbonatation et la protection des armatures contre la corrosion [29].

II.3.2. Résistances mécaniques

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. On a pu voir précédemment que la résistance dépend d'un certain nombre de

paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

$$R = k \left(\frac{C}{C+E+V} \right)$$

Avec

R = résistance du béton ;

k = coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre ;

C = dosage en ciment ;

E = dosage en eau ;

V = volume d'air subsistant.

Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

a-Variations volumiques

Au cours de son évolution, le béton est l'objet de modifications physicochimiques qui entraînent des variations dimensionnelles.

b- Retrait hydraulique avant prise et en cours de prise

Il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation (rapport élevé surface/volume des pièces, en atmosphère sèche, par temps chaud ou vent violent), soit par absorption (coffrage, granulats poreux). Une surface de béton frais peut évaporer plus d'un litre d'eau par m² et par heure. Ce retrait sera limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure (film freinant l'évaporation).

c- Retrait hydraulique à long terme

Il est dû à un départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il varie suivant les ciments (nature, finesse) et il est proportionnel au dosage en volume absolu de la pâte pure.

d- Retrait thermique

Il est dû à des baisses rapides de température provenant :

- soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges, qui provoque une élévation de température, suivie de son refroidissement ;
 - soit des variations climatiques du milieu. Ces deux causes additionnent parfois leurs effets.
- Les effets de la première peuvent être réduits en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation. L'ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 300 µm/m pour un béton usuel.

e- Déformations sous charge instantanée

Comme tous les autres matériaux, le béton a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée, c’est-à-dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées.

Le module d’élasticité instantané E_i au jour j d’un béton courant est lié à sa résistance en compression au même âge par une relation empirique telle que:

$$E_i = 11000 \sqrt{f_{cj}} \text{ (en MPa), (règles BAEL 91) ;}$$

R_{cj} = résistance à la compression au jour J (en MPa) ;

E_i est le plus souvent compris entre 30000 et 35000 MPa.

f-Déformations sous charge de longue durée: le fluage

Au-delà d’une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente, c’est ce qu’on appelle le phénomène du fluage.

On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois (voire années), est de l’ordre de trois fois la déformation instantanée [29].

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{R}{E}$$

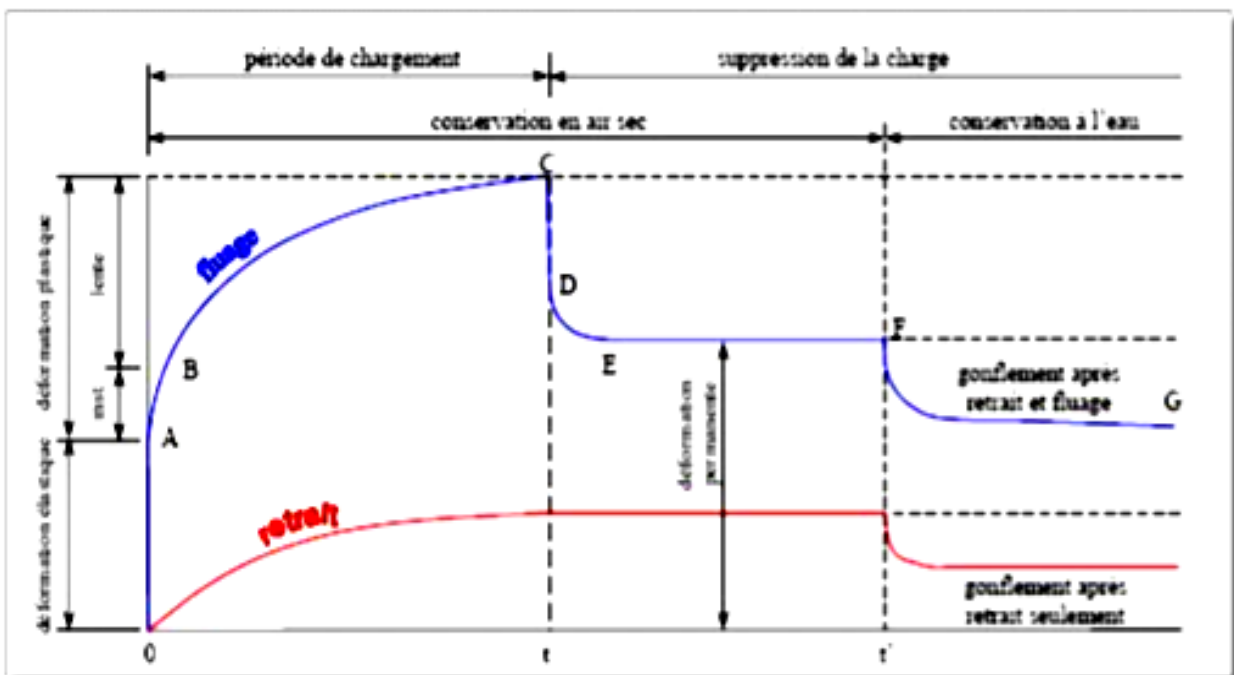


Figure II.3 Diagramme de fluage et retrait [27]

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais de compression.
- Les essais de traction par flexion.

II.3.2.1. Essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (Figure II.4). La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée [30].



Figure II.4 Essai de la résistance à la compression

II.3.2.2 Essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure II.5). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante [30]:

$$\sigma = \frac{Mf.a}{2I}$$

Avec le moment de flexion :

$$Mf = \frac{F.L}{4}$$

Où

F : la charge de rupture,

L : la portée,

I : l'inertie de flexion,

a : le côté du prisme.



Figure II.5 Mesure de la résistance à la traction par flexion

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

- Lors des essais destructifs, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques ; la plus courante en Algérie est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm; confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.
- Les essais non destructifs peuvent utiliser le scléromètre (figure II.6), appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son au travers du béton (4000 m/s pour un béton courant).



Figure II.6 Scléromètre à béton électrique [30]

Conclusion

Le béton est le matériau utilisé dans tout type de construction. Il présente le double intérêt d'être produit à moindre coût, et de répondre à de nombreuses contraintes, selon la formulation utilisée. Le béton peut être plus ou moins résistant, à l'épreuve des chocs thermiques, perméable, endurant, architectonique. C'est un matériau extrêmement polyvalent. Pour déterminer les différentes propriétés du béton, on étudie ses caractéristiques en laboratoire, en fonction de sa composition. On doit donc être capable de "tester" chaque formulation de béton, pour en déterminer les particularités techniques.

Chapitre III

Les fibres

Les fibres

III.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 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 [31].

III.2. Définition des fibres

Le terme Fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions " [32].

III.3. Différentes nature de fibres

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: fibres naturelles (fibres végétales, fibres minérales, fibres organiques), et fibres artificielles.

III.3.1. Fibres naturelles

III.3.1.1. Fibres végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales: les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois) [33].

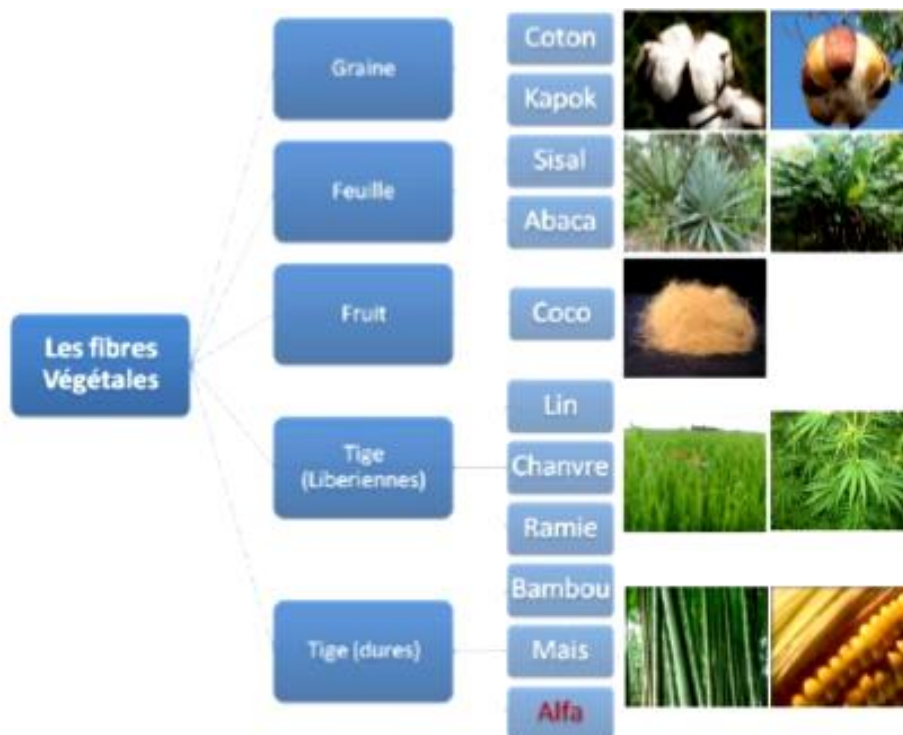


Figure III.1 Photo de quelques fibres végétales [34]

III.3.1.2. Fibres animales

Les fibres animales sont composées principalement de protéines. La kératine constitue les poils (dont les laines en tout genre) et les plumes. La soie est une sécrétion de fibroïne produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre bombyx et les araignées. La laine et les plumes sont des très bons isolants pour la construction.



Figure III.2 Photo de quelques fibres animales [35]

III.3.1.3. Fibres minérales

a-Fibres d'amiante

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait, des bâchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux microorganismes, ainsi que leur résistance électrique élevée.

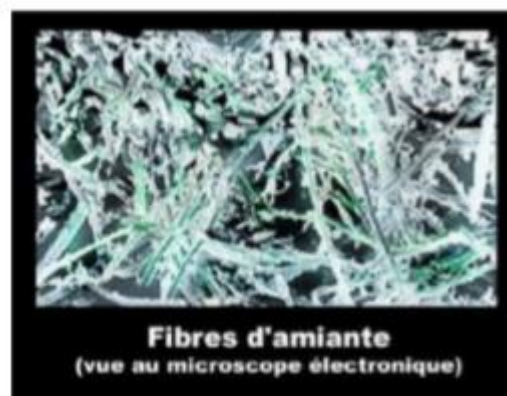


Figure III.3 Vue microscopique de fibres d'amiante [36]

Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes: voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur [36].

Tableau III.1 Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante [36]

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

b-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 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100µm.

**Figure III.4** Fibre de verre [36]

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 : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. 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 [36].

Tableau III.2 Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [36]

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture s_{f0} (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique ρ (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

c-Fibres de carbone

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes. Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres.

- les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module),
- les types hautes résistances soient les classes I THR ou VHS (Très haute résistance ou veryhighstrength) et HR ou HS (haute résistance ou highstrength).

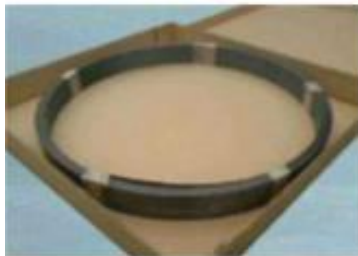


Figure III.5 Fibres de carbone [37]

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [37].

Tableau III.3 Propriétés mécaniques des fibres de carbone [37]

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

III.3.1.4. Fibres organiques

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir :

- Le polyamide, qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.

- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.

- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton. L'adhérence fibre-béton est généralement faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice, ce qui limite la reprise des efforts par les fibres à l'interface fibre-matrice après la fissuration de la matrice.

Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC, PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton [37].

De ce fait, de récentes études menées sur des bétons renforcés par ce type de fibres ont montrés que ce matériau composite présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verre [37].

Tableau III.4 Propriétés mécaniques des fibres de polymère [38]

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

III.3.1.5. Fibres Métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde.

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressé à la fibre métallique (acier), vue les caractéristiques (forme, élancement, caractéristiques physicochimique...etc.) qu'elles présentent. L'ajout des fibres au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $L_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités, donc l'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure.

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres :

- fibres ondulées-crantées-torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc... [39].

a- Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticités très élevé [40].

Parmi les fibres d'acier les plus utilisées nous citons :

b- Les Fibres Euro-Steel

Ce sont des fibres ondulées en acier à haute résistance, tréfilé, dur, à teneur en carbone inférieur à 0.15%. La contrainte limite de rupture en traction est de 1400 MPa [37].

c- Les Fibres Bekaert de Chez Dramix

Ces fibres en acier tréfilé sont fabriquées par Bekaert. Elles se présentent sous forme de plaquettes collées, ce qui facilite leur introduction dans le béton et évitent la formation d'oursins. En effet, la colle se dissout facilement dans l'eau de gâchage. Les fibres les plus courtes sont actuellement utilisées en béton projeté. Elles ont une résistance à la traction minimale de 1100 MPa. Leur diamètre varie de 0.4 à 0.8 mm et leur longueur de 25 à 60 mm [37].

d- Les Fibres Harex

La fibre Harex est obtenue par fraisage. Les copeaux, produits légèrement enroulés sureux-mêmes, possèdent une résistance à la traction d'environ 700 MPa

e- Les fibres Ruban en Fonte Amorphe de Pont-à-Mousson

Ces fibres sont développées par SEVA (Pont à-Mousson), sont des rubans de fonte amorphe obtenue par refroidissement brutal. Cette trempe crée une structure vitreuse qui est en partie à l'origine de sa résistance à la corrosion. Les longueurs commercialisées de ces fibres sont de 15, 30, 45 et 60 mm. Une de leurs caractéristiques importantes est leur grande résistance à la corrosion. La résistance à la traction de ces rubans est d'environ 200 MPa [37].

f- Les Fibres à Tête d'encrage en Acier Tréfilé

Ces fibres sont développées par EURO-STEEL, elles se distinguent par leur capacité à développer très tôt un bon ancrage, donc à limiter la chute d'effort post-fissuration.

L'angle d'inclinaison des têtes a été choisi pour permettre un confinement du béton [37].

g- Les Fibres de Beki-Shield

Ce sont des fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki-Shield, présentent des caractéristiques intéressantes, elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre. Ces fibres sont fabriquées à partir d'un acier inoxydable qui offre de très grande résistance à la corrosion [41].

D'autre part. DEBICKI [16].résume sur le tableau 1.4 quelques propriétés de fibres industrielles .Il met en évidence la nature très variée de ces fibres.

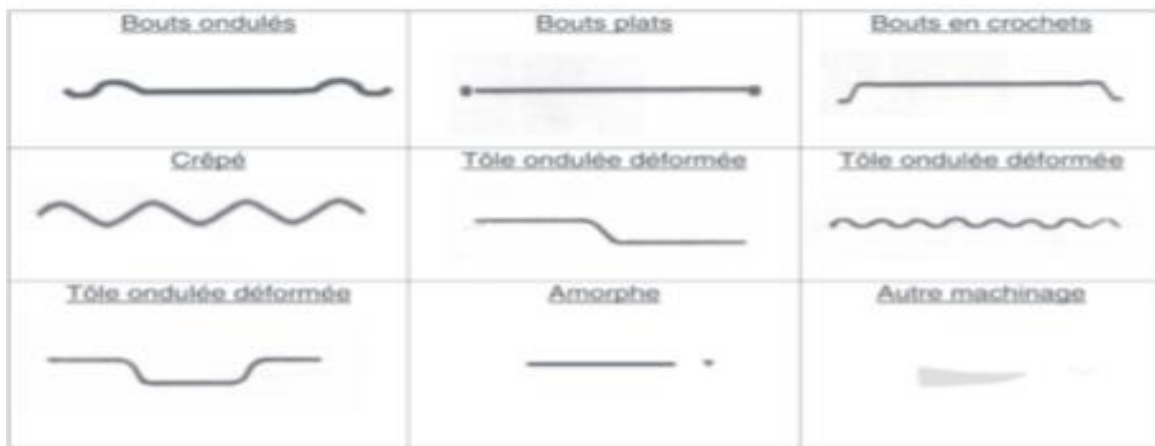


Figure III.6 Géométrie des fibres métalliques [37]

III.3.2. Fibres artificielles

En général les fibres synthétiques sont parmi les fibres les plus employées dans l'industrie et dans le renforcement du béton. Certaines fibres synthétiques sont fabriquées essentiellement pour le renforcement des bétons et des mortiers. Les fibres synthétiques sont obtenues par l'extrusion de granulés de polymères issus des produits hydrocarbonés ou d'amidon [42].

III.3.2.1. Nylon

Il s'agit des polyamides qui possèdent plusieurs avantages tels que la grande résistance à la traction (à la cassure et au déchirement) et l'absence à la réaction d'eau. Le nylon est la première fibre plastique commercialisée en 1938; depuis de nombreux tissus synthétiques sont apparus: les fibres acryliques, l'aramide, l'oléfine et le polyester. Ces fibres ont été étudiées également pour des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, tissus pare-balles, les fuselages et ailes d'avion, l'exploration spatiale, et les équipements sportifs de toutes sortes.

III.3.2.2. Polytoile

c'est un corps non tissé à base de fibres de polyester projetées, pressées, soudées, collées. Au toucher, elle ressemble assez à du papier, son grain est extrêmement fin. Afin d'obtenir une grande solidité et une haute résistance à la chaleur, il est possible d'allier des fibres de carbone, de silicium ou d'autres substances. La fibre de polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile, où il a connu une véritable extension.



Figure III.7 Des fibres de polypropylène

La fibre de polypropylène est la fibre synthétique la plus employée dans le renforcement des bétons, car elle est économique, légère, non absorbante, possède une grande déformabilité et elle ne réagit pas chimiquement avec le ciment. Le polypropylène possède aussi une bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa, une résistance chimique élevée, une meilleure tenue à l'abrasion, mais il est sensible aux ultra- violets. Son exposition prolongée au rayonnement solaire provoque une oxydation mais, noyé dans la matrice, il est protégé. Il convient d'utiliser les fibres de polypropylène de préférence pour les pièces minces devant résister soit aux chocs mécaniques, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement.

III.4. Propriétés des fibres

III.4.1. Notion de fibres structurales

La notion de fibres structurales n'est applicable qu'à certains types de fibres métalliques pour lesquelles les résistances résiduelles s'apparentent à l'action structurale des armatures traditionnelles. Il est important de réaliser que le terme « fibre structurale » est inapplicable à la plupart des types de fibres. Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les macrofibres synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis [43].

III.4.2. Facteur d'élancement

Le facteur d'élancement est défini par un ratio géométrique. Le facteur d'élancement est donc le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre.

Le tableau III.5 indique des valeurs de ratio pour certains types de fibres. Le lien entre la matrice du béton et la fibre augmente proportionnellement avec le facteur d'élançement. Par contre, les fibres avec un facteur d'élançement supérieur à 60 et dotées d'une géométrie particulière sont potentiellement susceptibles de former des « oursins » [43].

Tableau III.5 Facteur d'élançement [43]

Types de fibres	Élançement (L/D)
Macrosynthétiques	50-100
Métalliques	25-100
Fonte amorphe	1200-1400
Polypropylène	140-1700
Carbone	150-400

III.4.3. Performance

La performance des fibres est directement reliée à la valeur de résistance résiduelle qu'il est possible d'obtenir pour une formulation donnée d'un béton. La performance des fibres est évaluée selon différentes normes japonaises et américaines [43].

III.4.4. Valeur de résistance résiduelle

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des ouvrages de béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées et qu'il est possible de déterminer une valeur de résistance résiduelle. Effectivement, les fibres apportent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration. Les fibres permettent une reprise de charge en post-fissuration. Il existe trois méthodes d'essais de référence qui donnent des valeurs différentes pour la détermination de la résistance résiduelle :

- ASTM C1018 : détermine le facteur de résistance résiduelle;
- ASTM C1399 : détermine la résistance résiduelle moyenne;
- JCI SF-4 : détermine la résistance résiduelle équivalente. L'essai JCI SF-4 est le plus utilisé pour les méthodes de conception [43].

III.4.5. Distribution des contraintes mécaniques

Un des principaux avantages de l'ajout des fibres est le meilleur contrôle de la post-fissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton.

La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile du béton en s'opposant à la propagation des microfissures.

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations en post-fissuration relatives à :

- la résistance à la traction;
- la résistance aux impacts;
- la résistance à la fatigue;
- la résistance à l'abrasion;
- la réduction des fissures de retrait.

III.4.6. Résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion s'effectue selon les normes ASTM C 418 et C 779. Un article de la revue « Concrete Technology Today » de l'Association Canadienne du Ciment explique la résistance à l'abrasion de la manière suivante : les informations sur la résistance à l'abrasion du béton fibré sont rares et conflictuelles. Selon les valeurs disponibles, lorsque l'érosion est provoquée par la cavitation et par l'action abrasive d'un fort débit d'eau ou à l'impact de larges débris, c'est alors que le béton fibré améliore la résistance à l'abrasion. Par contre, pour une érosion de basse vitesse, c'est plutôt la propriété de la matrice et des granulats que celle de l'utilisation de fibres qui détermine la résistance à l'abrasion. De la même façon, c'est également la propriété de la matrice qui détermine la résistance à l'usure pour le pavage et les dalles sur sol [43].

III.4.7. Propriétés spécifiques à chaque type de fibres

Les fibres ont un rôle qui se traduit par des résultats variables, donc des applications différentes en fonction de leur nature. Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques. Selon leur type, les fibres métalliques, synthétiques ou naturelles ont une influence différente sur les propriétés du béton durci. Le type de liant utilisé dans le béton, la géométrie et la composition des fibres, ainsi que leur orientation, leur distribution et leur densité à travers le béton, sont des facteurs qui influencent les propriétés du béton frais et durci [43].

III.5. Choix du type des fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leurs natures ou leurs géométries. 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). Leur géométrie est très variable. 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.

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 [43].

III.6. Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton ou de mortier comme la résistance à la compression et 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 :

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 (III .8-a).

-La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure III .8-b) [44].

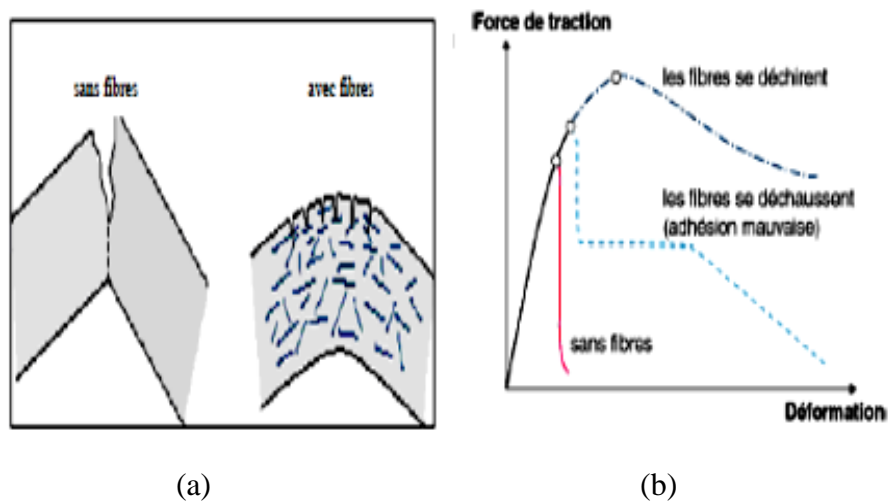


Figure III.8 Illustration de l'apport du renfort par des fibres [44].

Les fibres 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. En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture. La Figure (III.8) illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres [45].

Conclusion

L'étude bibliographique on a permis de distinguer plusieurs types de fibres ainsi que leur utilisation, et leurs propriétés.

Et pour cela, on va entamer des essais au laboratoire sur l'ajout des fibres métalliques pour savoir l'amélioration de la résistance mécanique du béton (compression et traction).

Chapitre IV

Béton fibré

Béton fibré

IV.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 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. [44].

IV.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 (Figure IV.1), 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 est 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 sont capable de l'arrêt et coudre les fissures (Figure IV.2). Les fibres permettent aussi d'améliorer ainsi le comportement postfissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. 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 affectant très fortement le comportement global du matériau durci [46].

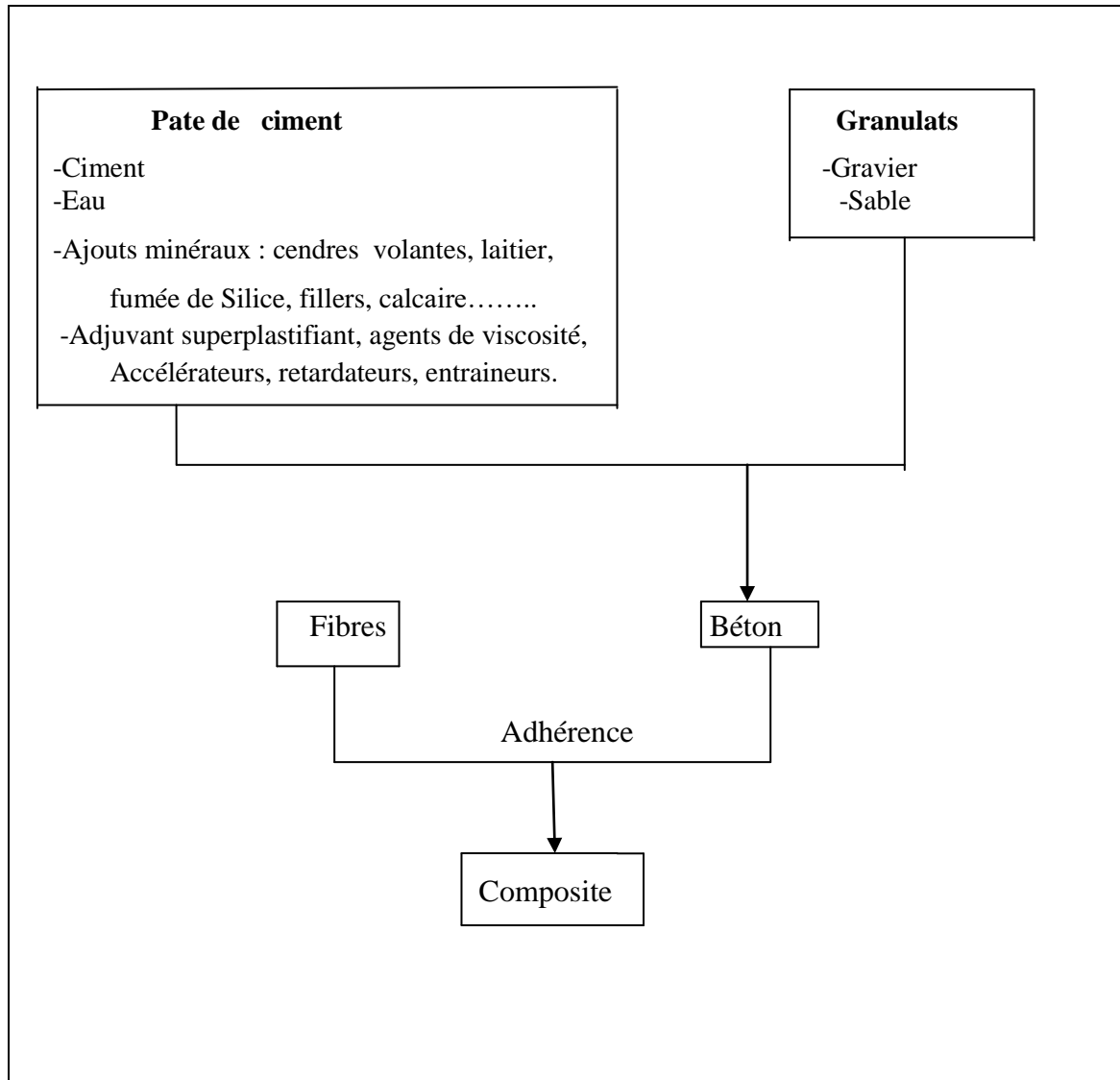


Figure IV.1 Modèle de composite à base des fibres [46]

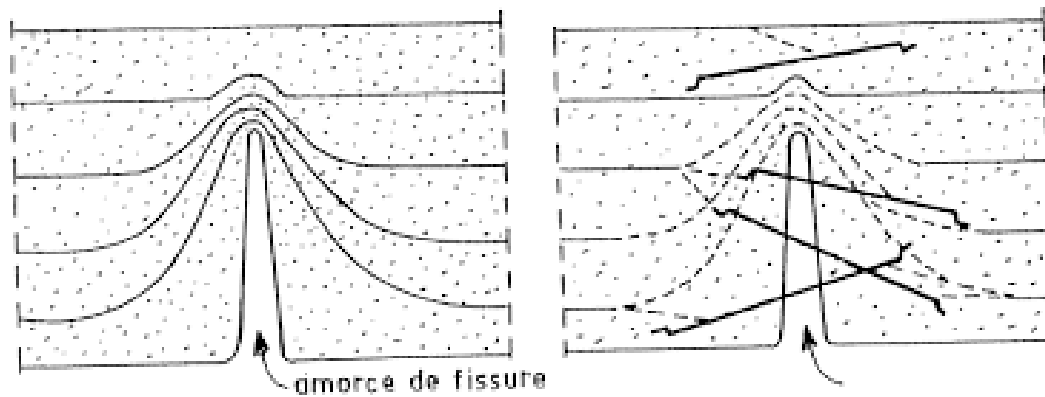


Figure IV.2 Rôle des fibres dans la matrice de béton [46]

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [47]

La (Figure IV.3) illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres. [44]

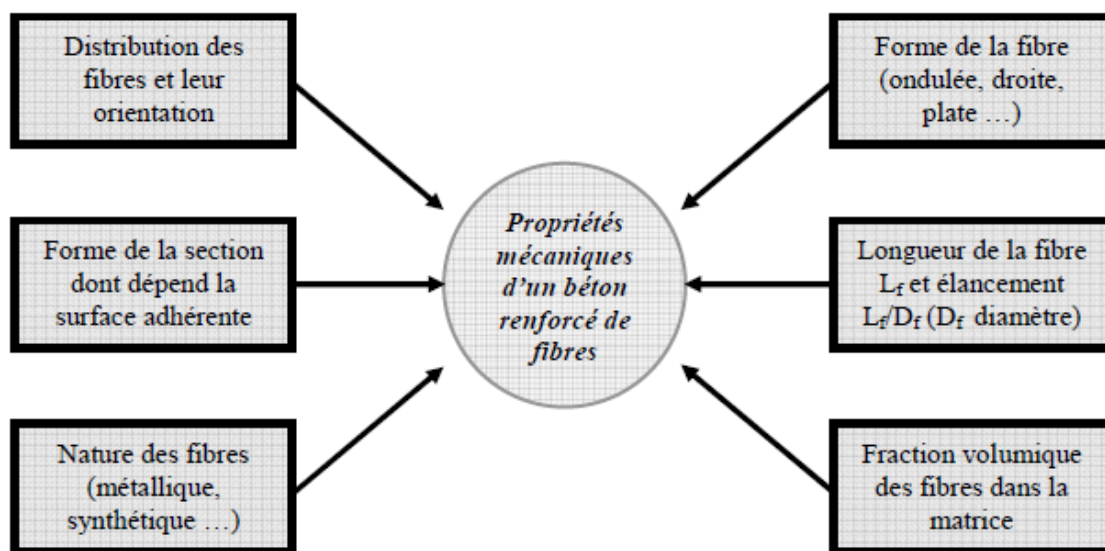


Figure IV.3 Différents facteurs influant sur le comportement mécanique D'un béton renforcé de fibre [44]

IV.3. Utilisation des fibres dans le béton

IV.3.1. Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post-fissuration [48]. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré. Il faut combiner tout apport de fibres dans le béton à des techniques d'insertion des fibres permettant d'éviter la formation « d'oursins ». [48].

IV.3.2. Contrôle du phénomène de la fissuration

Il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en post-fissuration selon l'efficacité du type de fibres utilisé. Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat (figure IV.4). L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.



Figure IV.4 Texture d'un béton fibré [48]

Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu [43].

IV.4. Durabilité des bétons fibrés

Quand on parle de durabilité des bétons de fibres, il faut se placer à deux niveaux (deux échelles) : celui du matériau et celui de la structure [49].

a) Le premier aspect

Le premier aspect à évoquer concerne le problème de la corrosion des fibres. Pour ce qui concerne les fibres synthétiques, à l'exception de certaines fibres d'aramide, il n'y a pas de problème de durabilité de la fibre dans le béton. Pour ce qui concerne les fibres métalliques, la corrosion des fibres peut bien évidemment survenir.

Le retour d'expérience et la recherche concluent sur deux points :

- la corrosion superficielle des fibres peut provoquer des salissures à la surface des structures exposées ;
- la corrosion superficielle des fibres ne génère aucune pathologie, ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures les utilisant.

Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- optimisant la formulation du béton fibré ;
- utilisant des coffrages non métalliques ou munis d'une "peau interne" (tissu synthétique, par exemple) ;
- utilisant des fibres galvanisées.

b) Le second aspect

Le second aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés concerne la tenue au feu des structures. Les fibres métalliques n'apportent pas un plus déterminant dans la tenue au feu des structures. Ce que l'on peut, simplement, souligner est qu'une structure en béton de fibres métalliques se comporte plutôt mieux vis-à-vis du feu qu'une structure en béton armé classique (moins d'éclatements).

Au contraire, certaines fibres synthétiques, notamment les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique. Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu (évaporation de l'eau présente dans le béton) [50].



Figure IV.5 Exemple de fibres macro-synthétiques utilisées en protection
Contre les incendies [50].

c) Le troisième aspect

Pour ce qui concerne la durabilité des structures en béton fibré, un dernier point important concerne le maintien dans le temps d'une fonction demandée à une structure donnée. A l'exemple d'un revêtement quelconque en béton fibré à qui on demande d'assurer une fonction d'étanchéité (vis-à-vis des infiltrations d'eau, par exemple). Du fait du fluage des fibres synthétiques, évoqué précédemment, cette fonction, un moment assurée par une structure en béton de fibres synthétiques, peut ne plus l'être quelque temps plus tard. Il s'agit d'un problème pour lequel les bétons de fibres métalliques ne sont pas concernés. [49].

Enfin, dans le cas d'éléments préfabriqués manu-portables, ou dans celui des structures susceptibles d'être en contact direct avec les usagers, des problèmes de sécurité peuvent s'opposer, s'agissant de bétons de fibres métalliques. Ce phénomène concerne surtout les bétons de fibres dont les fibres sont de petits diamètres, c'est-à-dire inférieures ou égales à 0,25 mm.

En effet, on ne peut jamais garantir à 100 % qu'aucune fibre métallique n'affleurerà à la surface de la structure, ce qui peut occasionner des blessures. Des solutions techniques existent pour pallier cet inconvénient, solutions dont il ne faut pas faire l'impasse. Ces problèmes de blessure occasionnés par des fibres n'existent pas avec les fibres synthétiques [50].

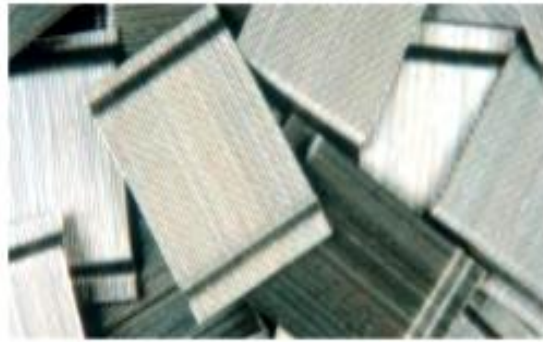


Figure IV.6 Exemple de fibres métalliques [50]

IV.5. Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique [43].

IV.5.1. Aspect technique

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse, principalement, au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont :

- une résistance aux impacts ;
- une résistance à la fatigue ;
- une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post-fissuration ;
- une énergie d'absorption élevée.

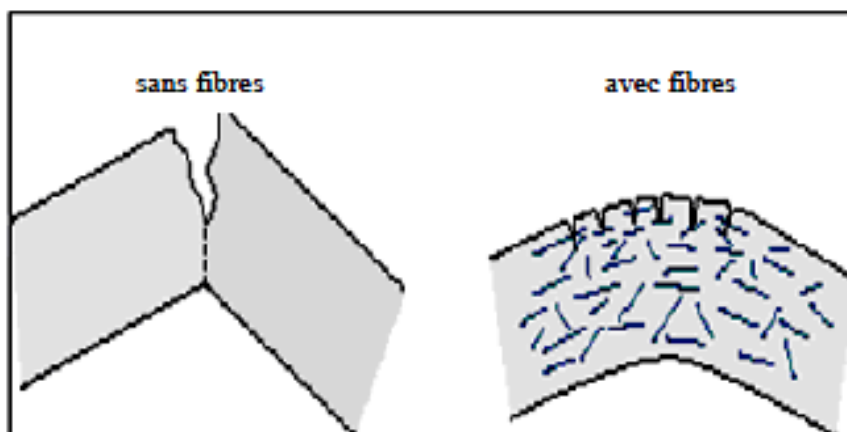


Figure IV.7 Fissuration dans le béton sans et avec fibres [52]

IV.5.2. Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- ✓ une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction ;
- ✓ une optimisation du dimensionnement.

IV.6. Domaines d'utilisation du béton fibré

De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles (Tableau IV.1).

Tableau IV.1 Domaines d'application privilégiés par type de fibres [43]

<i>Domaines d'application privilégiés par type de fibres</i>			
<i>Type de fibres</i>	<i>Dosage courant</i>	<i>Domaine d'application privilégié</i>	<i>Exemples d'application</i>
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	<ul style="list-style-type: none"> - Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression - Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux - Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement - Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	<ul style="list-style-type: none"> - Dallage - Voussoirs de tunnels - Revêtement d'ouvrages souterrains - Mortiers projetés - Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	<ul style="list-style-type: none"> - Parements architectoniques - Panneaux de façade - Éléments décoratifs

Tableau IV.2 Intérêt apporté par domaines d’application [53]

APPLICATIONS	INTERET APORTE PAR L’ADJONCTION DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges. - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.
Dallage, chaussées en béton, Dallage manufacturés, tous élément structurés et tous éléments structuraux soumis à la flexion	<ul style="list-style-type: none"> -diminution de 40 % de l’ouverture de fissures -augmentation de la rigidité après fissuration, -augmentation de la résistance au cisaillement, -augmentation de la résistance à l’usure.
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondation...etc.)	<ul style="list-style-type: none"> -amélioration de la charge ultime, -pas de rupture catastrophique.
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles exemple : Piste d’aéroport.	<ul style="list-style-type: none"> -l’énergie absorbée est plus importante, -la durée de choc est augmentée, -la loi de comportement du matériau est fortement Modifiée
Réparations des revêtements routiers, tablier de ponts.	<ul style="list-style-type: none"> -amélioration de la résistance aux chocs, -amélioration de la déformation
Parties exposées à la forte variation de température et même aux hautes températures.	<ul style="list-style-type: none"> -remplacement avec succès du revêtement réfractaires -diminution du cout de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains	<ul style="list-style-type: none"> -évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé -diminution du cout de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fabrication des pieux, revêtement ignifuges isolants (construction navales). Panneaux de revêtement de façade ...etc.	<ul style="list-style-type: none"> -augmentation de la résistance aux chocs, -augmentation de la résistance à l’usure, -augmentation de la durabilité de revêtement

IV.7. Comportement mécanique des bétons de fibres

IV.7.1 Effet des fibres dans une matrice

IV.7.1.1 La taille et la rugosité des granulats

La dimension des granulats est très importante pour avoir un bon béton résistant et maniable car avec une présence d'une certaine quantité de gros grains, le béton peut avoir une mauvaise ouvrabilité.

Les B.R.F (bétons renforcés de fibres) sont composés, en plus des gros granulats, d'une quantité de fibres, qui en entrant en contact avec ceux-ci tend à figer leur mouvement, fait qui se répercute, principalement, sur la maniabilité.

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des B.F.M. (béton de fibres métalliques) est souvent difficile et a toujours posé de problème. Ainsi pour faciliter cette mise en œuvre, la composition du béton ne doit en aucun cas contenir des éléments dont la taille est supérieure au quart de la longueur de la fibre (une dimension maximale d'environ 8 à 15mm), c'est la raison qui fait que les bétons de sable se révèlent compatibles à l'inclusion des fibres [51].

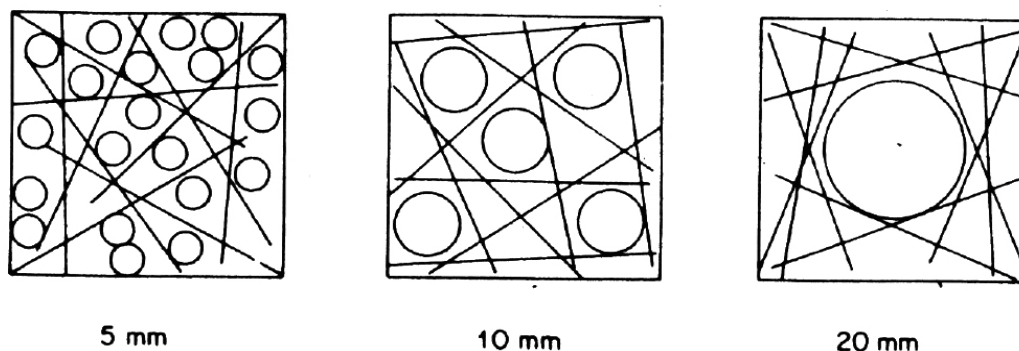


Figure IV.8 Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre [54]

IV.7.1.2. Influence de l'adhérence fibres matrice

L'adhérence fibres–matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice, l'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons:

- une liaison élastique ;
- une liaison de frottement ;
- une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets ondulation dentelles).

Des essais d'arrachement effectués par Eurosteel sur les fibres ondulées (1982) montrent que la résistance d'adhérence dépend de la teneur en ciment dans la matrice. Il existe une teneur en ciment voisine de 400 à 500 Kg/m² [55].

IV.7.1.3. Influence de la géométrie de la fibre

Plusieurs types de fibres ont fait l'objet de beaucoup de recherches, mais il est prouvé que les seuls types de fibres susceptibles d'augmenter la résistance à la traction du béton, par la transmission d'une palpable énergie de plastification et de rupture, sont celles dotées d'un système d'ancrage.



Figure 1V.9 Différentes forme de fibres [39]

Les deux prérogatives qui en découlent sont :

- 1) En se plastifiant, l'ondulation diffuse, dans le béton, une énergie capable de multiplier par 2.5 celle de la rupture en traction de la fibre.
- 2) Contrairement aux autres types de fibres, celles ondulées sont capables de s'agripper au béton. En effet, l'existence d'ondulations le long de ces fibres créent des réactions de butées et s'opposent par le fait au déchaussement de ces fibres [54].

IV.7.1.4. Influence du type de fibres

Le comportement global des éprouvettes de deux types de béton (béton armé de fibres et béton armé de fibres locales, en copeaux, de longueur de 30 et 50 mm, avec des pourcentages de 0,5 et 1%) est sensiblement le même pour les deux types d'éprouvettes. L'ajout des fibres au béton apporte une certaine ductilité.

Pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux. Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres (pour $l_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure [56].

IV.7.1.5. Influence du pourcentage en fibres

La figure 1V.10 montre l'influence du pourcentage en fibres sur le comportement des éprouvettes soumises à la traction par flexion. Pour chaque longueur de fibre, le phénomène est clairement mis en évidence tout en comparant les différentes courbes au béton témoin (sans fibres). Il apparaît que les fibres apportent une ductilité aux matériaux, la rupture devient ductile au lieu de fragile. L'effort maximal à la première fissuration ainsi que l'énergie de rupture augmentent en fonction du pourcentage en fibres [57].

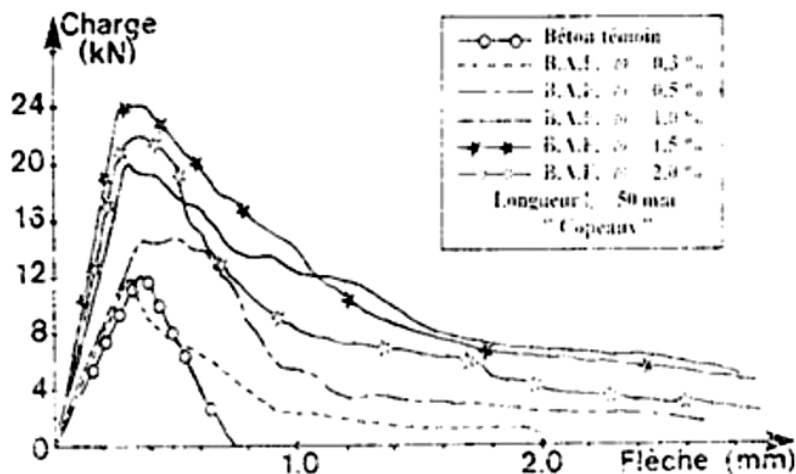


Figure 1V.10 l'influence du pourcentage en fibres sur le comportement des éprouvettes

IV.7.1.6. Influence de la longueur des fibres

Avec le béton de fibres en copeaux, pour des pourcentages 0,3; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 et 2,5%, et des longueurs de 30 et 50 mm, pour des faibles pourcentages, la longueur n'affecte que très peu le comportement des éprouvettes en traction. Par contre, plus le pourcentage augmente, plus l'effet de la longueur des fibres n'est important. A pourcentage égal, les fibres les plus longues sont plus efficaces pour couder les fissures. L'effort nécessaire à l'arrachement des fibres ainsi que l'énergie de rupture sont plus importants [58].

IV.7.2. Résistance mécanique

IV.7.2.1. Résistance des bétons de fibres en compression

Le comportement en compression du béton renforcé de fibres se résume en trois phases qui sont les trois parties indissociables du diagramme effort déformation:

- La première phase, avant microfissuration, est traduite par une partie linéaire de la courbe, - Effort-déformation : celle-ci est identique à celle du béton témoin pour toute valeur de l'effort inférieure à 50% de la charge de rupture. Cela nous permet de dire que le module de Young est insensible à la présence des fibres durant cette phase.
- La seconde phase est représentée par un diagramme courbé, durant laquelle la courbe relative à un BFM commence à se démarquer de celle du béton témoin. Ceci est dû à l'amorçage des microfissures et par conséquent la mise en service des fibres qui se mettent en tension
- Dans la dernière phase, qui va dans une direction descendante, les fibres reprennent la quasi-totalité de l'effort tout en maintenant le béton fissuré, en un seul bloc.
- D'après SERNA ROS(1984), la résistance ultime et le module d'élasticité d'un BFM sont très proches de ceux du béton témoin. Néanmoins, les fibres nourrissent le béton, au-delà du pic, d'une énergie, produisant ainsi un comportement ductile et corrélativement une augmentation de la déformation à la rupture, voir la figure 1V.10.

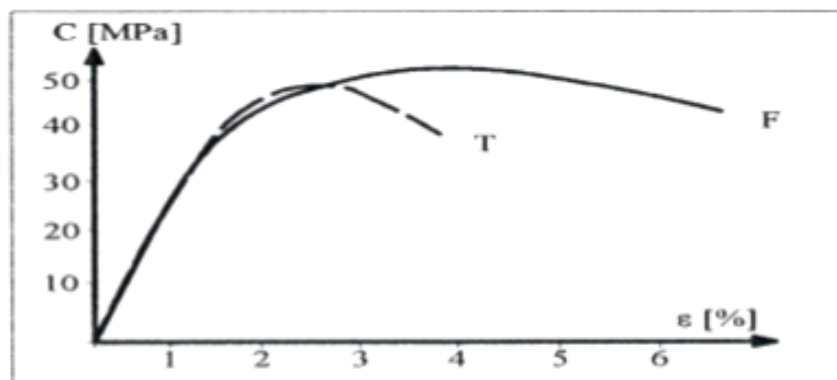


Figure 1V.11 Courbe contrainte déformation en compression simple [57]

IV.7.2.2. Résistance des bétons de fibres à la traction

Il est bien connu que la réalisation d'un essai de traction digne de confiance pose de multiples problèmes et donc s'avère d'un coût élevé. Ceci conduit que les chercheurs qui ont emprunté cette voie difficile sont assez peu. La majeure partie des travaux sur le béton de fibres tente à améliorer le comportement en traction du béton seul qui est très fragile. Pour évaluer les caractéristiques du béton de fibres, et les performances, on analyse les courbes charge-

déformation ou charge– déplacement des éprouvettes soumises à la traction Dans le cas du béton sans fibres, le diagramme effort-déformation est caractérisé par une phase pratiquement linéaire qui aboutit, dès l'apparition de la première fissure, à la rupture fragile du matériau. Les fibres ne sont pas aussi efficaces dans le support d'effort de traction, bien que de modeste augmentation de résistance puisse se produire [59]. Donc, les fibres sont ajoutées pour améliorer le comportement du matériau une fois la matrice est fissurée et ainsi de contrôler la fissuration du composite. Sur le diagramme effort - déformation du béton de fibres, on peut distinguer trois stades de comportement (Figure 1V.11).

Le comportement pré-fissuration qui se caractérise par le processus de propagation de microfissures avant la formation d'un système de fissures continues au droit de la section critique au pic. Le comportement avant pic des composite cimentaire renforcé de fibres en traction dévié de la linéarité, quand la propagation des microfissures a déjà commencé. Le transfert élastique du cisaillement est le mécanisme principal à considérer pour la prédiction de la limite de proportionnalité ainsi que l'apparition de la première fissure dans le composite.

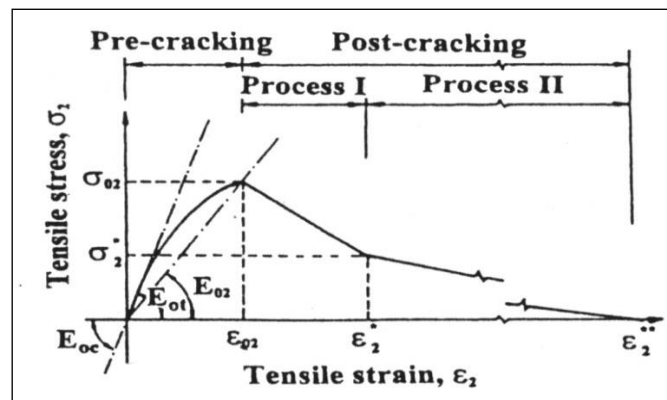


Figure 1V.12 courbe contrainte-déformation (BEKAERT1986)

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté une recherche bibliographique sur l'utilisation des fibres dans le mélange du béton pour améliorer les caractéristiques mécaniques des structures réalisées avec du béton par l'augmentation d'une part de la résistance à la compression et d'autre part de la capacité en flexion qui est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette amélioration est en fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique dans le béton. Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton ont été présentés selon les deux aspects technique et économique.

Dans le chapitre suivant on va présenter un programme expérimental pour évaluer l'influence des fibres avec différents pourcentages sur la résistance mécanique des éprouvettes en béton.

Chapitre V

Etude Expérimentale

Etude Expérimentale

V.1. Introduction

Le béton est constitué par un mélange intime de matériaux inertes, appelés « granulats » (sable, graviers, pierres cassées...) avec du ciment et de l'eau. Grâce à l'action du ciment, le mélange ainsi obtenu, appelé « béton frais », commence à durcir après quelques heures et acquiert, progressivement, ses caractères de résistances, et pour confectionner un béton selon les normes adéquates, il faut connaître les caractéristiques des différents constituants. La caractérisation des matériaux est indispensable pour toute recherche ou étude d'investigation, parce que chacune de ces caractéristiques a une influence importante sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant du béton par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire. [59].

Ce chapitre, sera consacré à la détermination des caractéristiques des différents matériaux entrants dans la composition du béton et leur classification selon des normes, formulation de Dreux-Gorisse. En utilisant le dosage 350kg. Puis on détermine la résistance des éprouvettes de référence (sans fibres) et des éprouvettes préparées avec le même béton mais en ajoutant des pourcentages de fibres.

V.2. Matériaux utilisés

V.2.1 Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, on a utilisé un sable local prélevé de **carrière OKADH W/TEBESSA**, il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/3) et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région.

V.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland composée **CPJ-CEM II/A-M (PL) 42,5N**. Il provient de la cimenterie d'El Malabiod (Wilaya de Tébessa). Ce produit Convient pour : les bétons armés et non armés, préfabriqués ou précontraints, étuvés et auto étuvés; les ouvrages en génie civil et en travaux publics.

V.2.3. Gravier

Pour assurer une bonne maniabilité (fluidité) à notre béton, nous avons choisi trois types de gravier, il s'agit de gravier de type (3/8), gravier (8/15) et gravier (15/25) de nature calcaire, provenant pour notre région du gisement de **Carrière OKADH W/TEBESSA**.



Photo V.1 Les matériaux utilisés

V.2.4. Eau de gâchage

Le rôle de l'eau de gâchage est prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci. L'eau de gâchage utilisée pour formuler le béton est celle du robinet de laboratoire de l'est (LTPE) de Tébessa.

V.3. Caractérisation des matériaux

V.3.1. Essais sur granulats

V.3.1.1 Analyse granulométrique (NF P 18-560 septembre 1990) [12]

L'élaboration d'une composition de béton nécessite une connaissance parfaite de la granulométrie et de la granularité. Donc il est nécessaire de tracer la courbe granulaire des granulats utilisés pour déterminer la composition optimale du béton.

a. But de l'essai

Pour de nombreux travaux et pour l'exécution de nombreux essais, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques de matériaux utilisés, caractéristiques qui représentent:

- Les dimensions ;
- La forme ;

- La masse volumique ;
- La porosité ;
- La teneur en impureté, de l'échantillon qui a été prélevé.

L'analyse granulométrique est la première de ces recherches, elle caractérise ces granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent, et le pourcentage des grains de chaque grosseur.

b. Principe de l'essai

L'analyse consiste à séparer et classer les grains constituant l'échantillon selon leur grosseurs en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

c. Matériel utilisé

Ce sont des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique, depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 80mm. Les dimensions nominales normalisées des tamis, seuls appareils utilisés actuellement selon la norme (NF P 18-560).

d. conduite de l'essai

Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C, et après avoir pris le poids de l'échantillon, on emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers pour une analyse complémentaire. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'éviter toute perte de matériau pendant le tamisage (Figure V.2).



Photos V.2 Colonnes de tamis

On appellera tamisât, le poids du matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé sur le tamis supérieur et on met le couvercle pour éviter la dispersion de la poussière. On agite manuellement ou mécaniquement cette colonne de tamis. Puisque cette répartition ne sera pas complète, on prend chaque fois un tamis en adoptant un fond et un couvercle et en agitant ce tamis horizontalement en le tenant d'une main et en le frappant par l'autre. On pèse le refus jusqu'au dernier tamis. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit R_1 la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent, soit R_2 la masse du deuxième refus.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis.

▪ **Dimensions des tamis utilisés**

Pour les sables, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

0,063 - 0,08 - 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5,0.

Pour les graviers, on utilise les tamis d'ouverture (en mm) :

6,3 - 8 - 10 - 12,5 - 16 - 20 - 25 .

▪ **Préparation de l'échantillon**

La prise de l'échantillon est effectuée par quartage.

La masse du matériau utilisé sera tel que : $M \geq 0.2 D$ selon la norme (NF 18-560) tel que :

M : Masse de l'échantillon en kilogrammes (kg).

D : Diamètre du plus gros granulat, exprime en millimètre (mm).

Les masses des échantillons soumises à l'essai, sont les suivantes :

15/25 $M \geq (0.2).25 = 5 \text{ kg}$

8/15 $M \geq (0.2).15 = 3 \text{ kg}$

3/8 $M \geq (0.3).8 = 2.4 \text{ kg}$

Sable 0/3 $M \geq (0.2).3 = 0.6 \text{ kg}$

Les résultats des analyses granulométriques pour les gravillons 15/25, 8/15, 3/8 et 0/3 sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau V.1 Analyses granulométriques du 15/25

Masse de l'échantillon soumis à l'essai M (échantillon) =5000 g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
25	0	0	100
20	160	3.2	96.8
16	3185	63.7	36.3
14	4400	88	12
10	4900	98	2
8.0	4985	99.7	0.3

Tableau V.2 Analyses granulométriques du gravier 8/15

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : M '(échantillon) =5000g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
16	0	0	100
14	275	5.5	94.5
10	1810	36.2	63.8
8.0	3210	64.2	35.8
6.3	4600	92	8
4.0	4900	98	2
2.0	4970	99.4	0.6

Tableau.V.3 Analyses granulométriques du gravier 3/8

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : M (échantillon) =2972g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
8.0	0	0	100
6.3	225	7.5	92.5
4.0	2145	71.5	28.5
2.0	2950	98.33	1.67
1.0	2960	98.67	1.33

Tableau V.4 Analyses granulométriques du sable 0/3

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : M (échantillon) =1000g			
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés Rn (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
6.3	0	0	100
4.0	15	1.5	98.5
2.0	315	31.5	68.5
1.0	610	61	39
0.5	800	80	20
0.315	820	82	18
0.25	830	83	17
0.125	865	86.5	13.5
0.063	900	90	10

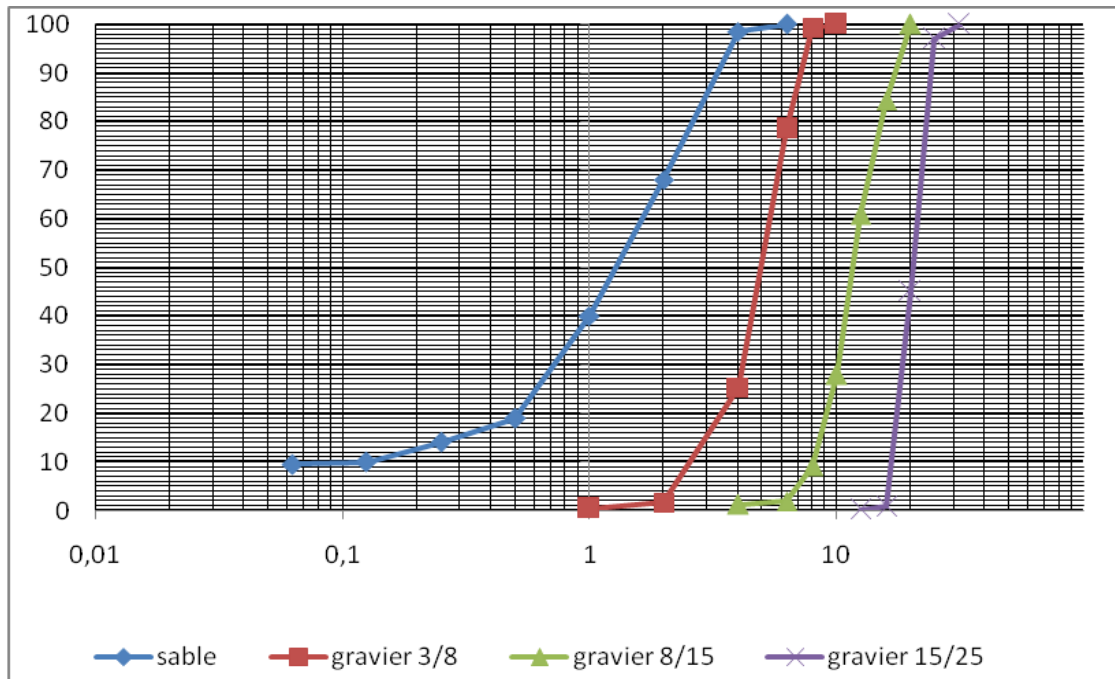


Figure V.1 Les Courbes granulométriques

V.3.1.2. Masse volumique (NF P 94-064 Novembre 1993)

La masse volumique d'un granulat est le rapport entre sa masse et son volume. Pour un granulat donné, ce rapport est une constante qui est propre aux caractéristiques physiques du granulat. Elle permet d'établir un lien entre sa masse et son volume. La masse volumique permet donc de connaître le volume d'un granulat lorsque l'on connaît sa masse et réciproquement.

L'observation d'un granulat montre que les grains qui le constituent sont entourés de vide. Par conséquent le volume d'un granulat peut désigner deux choses :

- Le volume des grains avec l'air (masse volumique apparente) ;
- Le volume des grains seuls (masse volumique absolue).

Ainsi, on peut constater, qu'il existe deux volumes pour désigner un granulat. Il existe alors deux masses volumiques.

➤ La masse volumique apparente [12]

a. But de l'essai

Cet essai permet de déterminer la masse volumique apparente d'un corps (sable, gravier). C'est à dire la masse en kg de ce corps, pour 1m³ de volume. Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains.

b. Principe de l'essai

L'essai de mesure de la masse volumique apparente consiste à remplir, des agrégats, un récipient de volume et de masse préalablement connus (récipient homologué). Les agrégats y est déversé jusqu'à remplir complètement le récipient. Le niveau des agrégats est ajusté à celui du récipient par arasage. La masse des agrégats est divisée par le volume du récipient pour donner la masse volumique apparente du matériau.



Photo V. 3 Mesure la masse volumique apparente

c. Calcul

La formule qui permet de calculer ce paramètre est : $\rho_a = M/V_a$

Tels que ρ_a : la masse volumique apparente (g/cm^3).

M : la masse d'échantillon (g).

V_a : le volume apparent de l'échantillon (cm^3).

➤ La masse volumique absolue [60]**a. But de l'essai**

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

b. Principe de l'essai

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide (en général d'eau) que déplace l'introduction de corps.



Photo V.4 Mesure la masse volumique absolue

c. Calcul

La masse volumique absolue est déterminé par la relation suivant $\rho_s = M/V_s$

Tels que ρ_s : la masse volumique absolue (g/cm^3).

M : la masse d'échantillon(g).

V_s : le volume absolu de l'échantillon (cm^3).

Tableau I.5 Les masses volumiques des matériaux employés

Caractéristiques physiques	Sable	Gravier		
		3/8	8/15	15/25
Masse volumique apparente en (g/cm ³)	1.52	1.41	1.40	1.39
Masse volumique absolue en (g/cm ³)	2.64	2.66	2.67	2.62

V.3.1.3. Module de finesse de sable (norme NF P18-304)

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse est égal au 1/100 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

Lorsque MF est comprise entre :

$$MF = 1/100 \sum \text{Refuscumulesen} \% (0,16-0,0,63-1,25-2,5-5)$$

- 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. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

$$MF = 1.5+23+52+75+84+89.5/100 = 3.25$$

Donc notre sable est un sable grossier.

V.3.1.4. Equivalant de sable (NF P 18-598 Octobre 1991)

a. But de l'essai L'essai

L'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Et surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton. Car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

L'essai équivalent de sable révèle très intéressant au laboratoire et sur chantier grâce à sa simplicité, sa rusticité, son faible coût et sa rapidité.

b. Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0.315 mm du matériau étudié. Le tamisage se fait par voie humide pour ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 min, on mesure les éléments suivants :

- La hauteur h_1 : sable propre + éléments fins.
- La hauteur h_2 : sable propre seulement.

Il y a 2 façons de mesurer h_2 , soit visuellement pour déterminer ESV (équivalent de sable à vue), soit avec un piston pour déterminer ES.

Le mode opératoire à une grande influence sur le résultat donc il faut le suivre scrupuleusement.

L'essai est effectué avec 500 g de grains. Il est préférable d'utiliser un échantillon sec, pour éviter les pertes des éléments fins du sable.

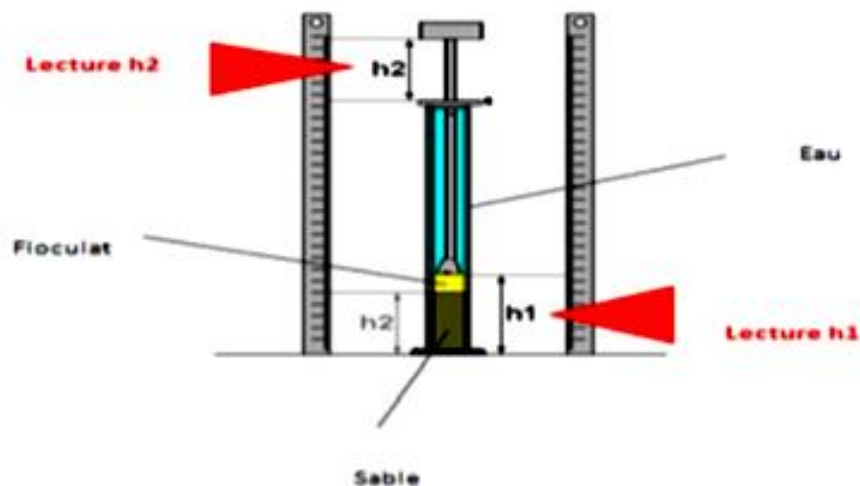


Figure V.2 Mesure de l'équivalent de sable

Tableau V.6 Classification de la nature de sable en fonction d'E.S

E.S	Nature et qualité du sable
E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 < E.S < 80	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S > 80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

c. Calcul de l'équivalent de sable

L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est par définition mesuré au piston et donné par la formule :

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

Eprouvette 1 : h₁ = 12 cm	ES₁ = 72,09 %
h₂ = 9,6 cm	ES_{moy} = 75 %
Eprouvette 2 : h₁ = 13,6 cm	ES₂ = 77,91 %
h₂ = 9,1 cm	

Alors on a un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses

V.4. Formulation de béton

Pour l'étude expérimentale de la formulation du béton, on a utilisé la méthode de DREUX-GORISSE.

V.4 .1. La formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse

➔ Résistance visée

Par sécurité, la résistance visée est majorée de 15 % par rapport à la résistance que nous souhaitons obtenir. Ainsi, la résistance visée est obtenue comme suit :

- La résistance désirée pour le béton à 28 jours est: $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$
- La résistance visée vaut alors: $f_{c28} = f_{c28} \times 1.15 = 30 \times 1.15 = 34.5 \text{ MPa}$

La formule ci-dessous permet de calculé la résistance à la compression visée à 28 jours, soit :

$$f_c = G.FCE (C/E - 0,5)$$

Avec : $G = 0.50$ (coefficient granulaire) (Annexe 01)

$D_{max} = 31,5 \text{ mm}$

Le ciment employé est de la classe 42,5.

L’ouvrabilité désirée est caractérisée par un affaissement au cône $A = 7\text{cm}$ (Béton plastique, vibration courante (Annexe 1).

Rapport C/E :

$$C/E = f_{cm} / G \times \sigma_{c28} +$$

$$C/E = 34.5 / 0.50 \times 45 + 0.50 = 2.03 \quad \text{➔} \quad C/E = 2.03$$

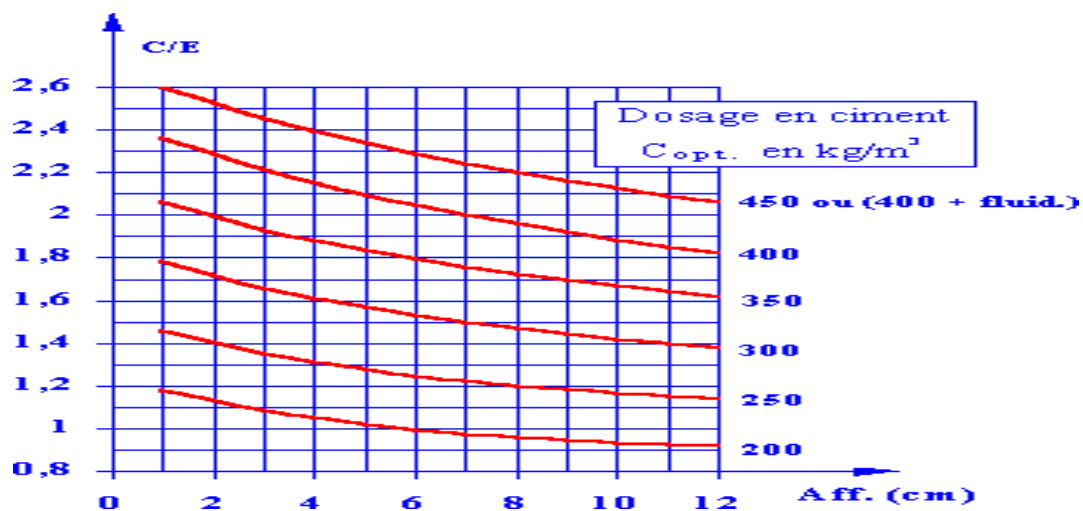


Figure V.3 Abaque permettant d’évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l’ouvrabilité désirée (affaissement au cône d’Abrams)

- Pour un affaissement théorique = 7cm et pour $CE = 2.03$ l’abaque de la Figure V.3 donne un dosage en ciment $C = 350 \text{ kg/m}^3$.

➔ Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera approximativement : $E = 350 / 2.03$
 $E = 172.41 \text{ L/m}^3$

Correction sur E Abaque

Tableau V.7 Correction sur le dosage en eau en fonction de D

Dimension maximale Des Granulats D en mm	4	8	12.5	20	31.5	50	80
Correction sur le dosage en eau	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

$D = 31.5$

Correction = -4

$E_c = E = 172.41 \times (-4/100) = 179.31 \text{ l/m}^3$

$E_c = 179.31 \text{ l/m}^3$

➤ **Tracé de la courbe granulaire de référence AOB**

Nous traçons une courbe de référence OAB avec :

- Le point O est repéré par ses coordonnées : [0,01 ; 0]
- Le point B est repéré par ses coordonnées suivantes : [D ; 100]
- Si $D > 20 \text{ mm}$ l'abscisse est située au milieu du « Segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D.

Le point de brisure A aux coordonnées suivantes :

- **En abscisse**

Le plus gros granulats est $D = 31,5 \text{ mm}$ (module 46), donc le point de brisure à pour

$A = 12,5 \text{ mm}$

- **En ordonné**

$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$

Pour notre premier cas : $K = + 2$ (Annexe 3).

$K_p = 0$ (puisque notre béton n'est pas pompable).

$K_s = (6 \text{ Mfs} - 15)$

$K_s = ((6 \times 3.25) - 15)$

$K_s = 4.5$

$$YA=50-\sqrt{D+K+Ks+Kp}$$

$$YA=50-\sqrt{31.5+2+4.5+0} = 43.84$$

$$YA= 43.84$$

Ainsi, les coordonnées du point de brisure A sont : [12,5 ; 44,19]

Les lignes de partage de 95 % et 5% d'ordonnée sont tracées sur la (figure V.4).

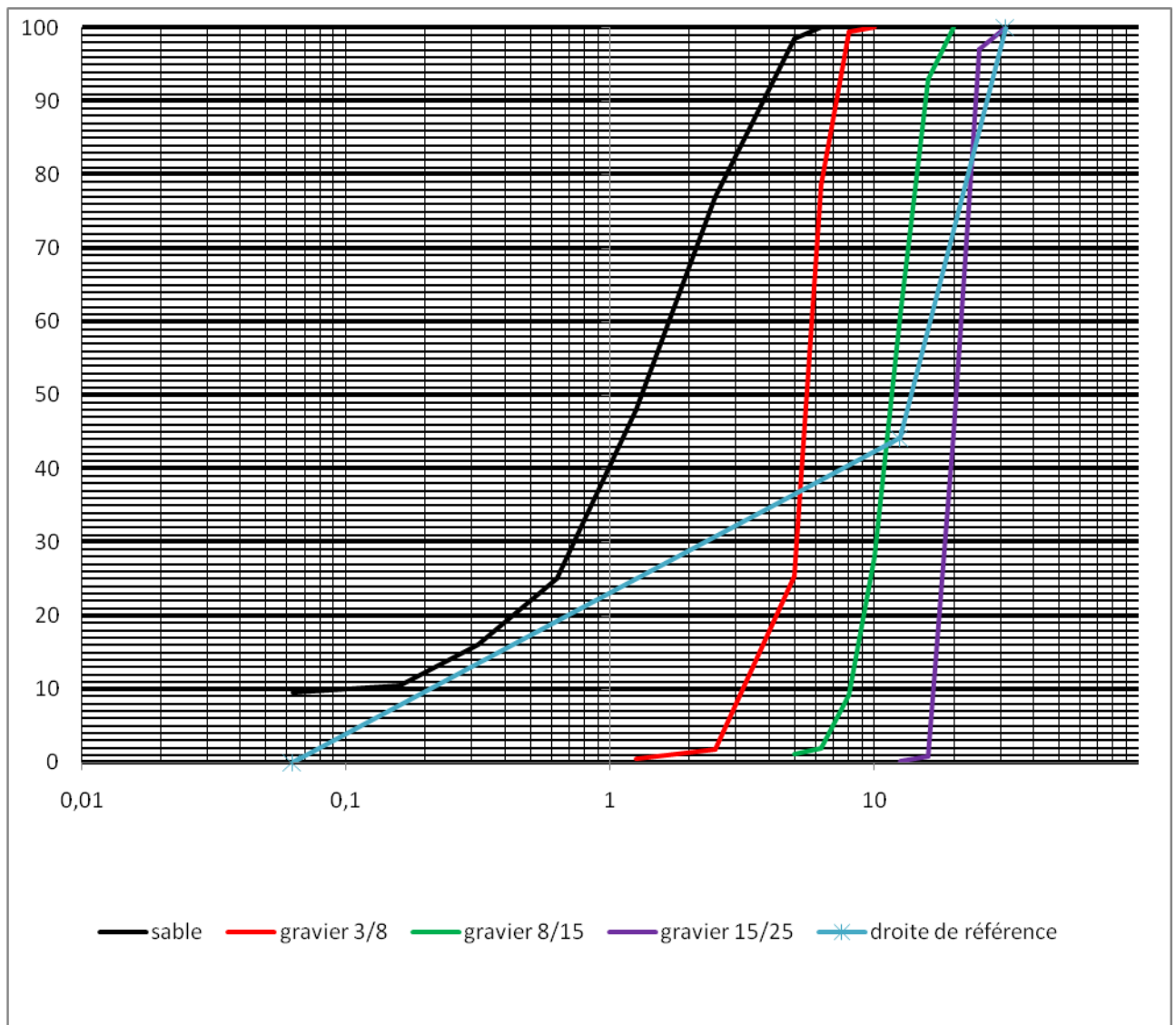


Figure V. 4 Courbe granulaire de Dreux-Gorisse (dosage 350 kg)

Tableau V.8 Les pourcentages des granulats

Les constituants		Quantités
Sable	0/3	33 %
Gravier	3/ 8	07 %
Gravier	8/15	22 %
Gravier	15/25	38 %

➔ Détermination de la composition en volume absolu

Le dosage en béton est déterminer pour obtenir un mètre cube de béton en place cela signifie que le volume de matière vante 1 m^3 :

$$V_{\text{abs}} = V_s + V_g + V_c$$

$$V_c = C / 3,1 = 350 / 3,1 = 112,90 \text{ L/m}^3$$

En adoptant pour le coefficient de compacité : $D_{\text{max}} = 31,5 \text{ mm}$, béton plastique, et vibration faible (Annexe 4).

Volume absolu de granulats

De la relation

$$\gamma = V_s + V_g + V_c$$

En remplaçant le volume de granulats

$$V_s + V_g \text{ par la valeur } VG,$$

Alors :

$$\gamma = V_c + VG \text{ où } VG = (1000 \times \gamma) - V_c$$

VG : Volume absolue des granulats en litre ($VG + V_g + V_s$)

γ : Coefficient de compacité (sable et gravier concasse : - 0,03) (Annexe 04)

La valeur $\gamma = 0,830$

$$\gamma = 0,830 - 0,03 = 0,800$$

$$\text{Alors : } VG = (1000 \times 0,800) - 112,90 = 687,1 \text{ L/m}^3$$

Volume de sable

$$V_s = 33 \% \times 687,1 = 226,743 \text{ L/m}^3$$

Volume des graviers

$$VG = 64\% \times 687,1 = 439,744 \text{ L/m}^3$$

Volume de gravier (3/8) = 7% × 687.1 = 48,097L/m³

Volume de gravier (8/15) = 27 % × 687.1 = 185,517L/m³

Volume de gravier (15/25) = 33 % × 687.1 = 226,743L/m³

Détermination de la composition pondérale sèche en kg :

Masse de ciment C = 350 kg/m³

Masse d'eau E = 179.31L/m³

Masse de sable (0/3) S = Vs × Mvabs = 226.743 × 2,642 = 599.055kg/m³

Masse de gravier G = VG × Mvabs

G3/8 = 48.097 × 2,665 = 128,178 kg/m³

G8/15 = 185,517 × 2,683 = 497.742 kg/m³

G15/25 = 226.743 × 2,691 = 610.165kg/m³

Tableau V.9 Dosage pondérale des granulats kg/m³

Désignations	Volume l/m ³	Dosage pondérale des granulats Kg /m ³
gravier 15/25	226.74	610.16
gravier 8/15	185.52	497.75
gravier 3/8	48.10	128.19
sable 0/3	226.74	599.05

V.4.2.Préparation des fibres métalliques

Pour la fabrication d'un béton fibré, on a utilisé des copeaux d'acier issues du fils d'attache inoxydable, dans le but de leur utilisation dans la composition du béton est d'améliorer la résistance mécanique du béton. Les fibres de fil d'attache ont une forme régulière, une bonne résistance à la traction avec un allongement à la rupture importante.

Dans notre travail on a préparé deux formes de fibre à partir d'un acier inoxydable (fil d'attache).

V.4.2.1. la forme plate (rectiligne)

L'acier du fil d'attache est nivelé par le marteau. Puis on a coupé le fil d'attache au moyen d'une tenaille en morceaux de longueur de 5cm.



Photo V.5 l'acier de fil d'attache



Photo V.6 Fibres coupées

V.4.2.2. la forme ondulée (crêpée)

Pour préparer des fibres en acier de forme ondulée, on prend une planche de bois, sur laquelle on fixe un ensemble de clous placé d'une façon qui assure la fabrication des fibres ondulées. L'acier est coupé en morceaux de longueur de 10cm.



Photo V.7 Planché utilisé

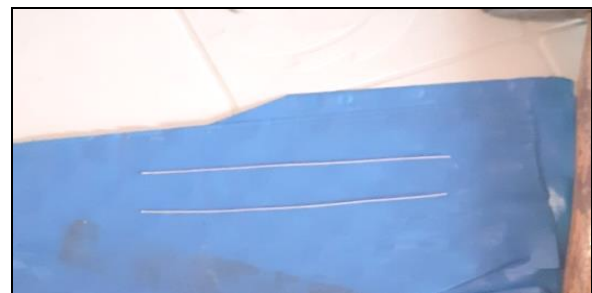


Photo V.8 Fibre coupée avant l'ondulation

En dernière étape, les morceaux d'acier sont formés sur les clous fixés sur la planche pour avoir la forme ondulée.

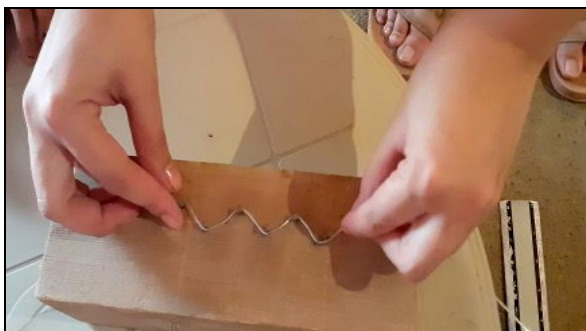


Photo V.9 Fabrication des fibres ondulée



Photo V.10 Fibres ondulées

➤ **Fibres Métallique**

- **Fibre en acier à bouts plat :**

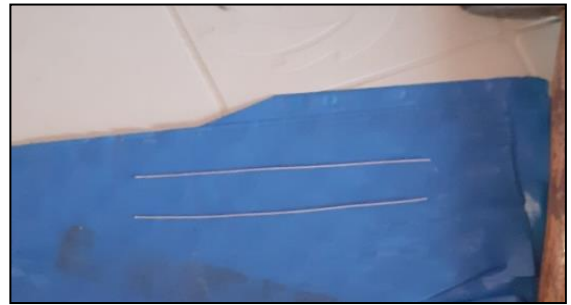
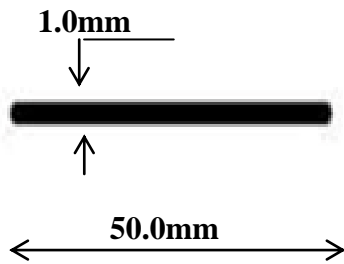


Figure V.5 Fibres en acier rectiligne

Tableau V.10 Dimension des fibres a bouts plats

Dimensions	Caractéristiques
Longueur (droite)	50.0 mm (± 3 mm)
Diamètre	1.0mm (± 0.04 mm)
Quantité	1040g
Masse volumique	7.85g/cm ³

- **Fibre en acier ondulés (crêpes)**

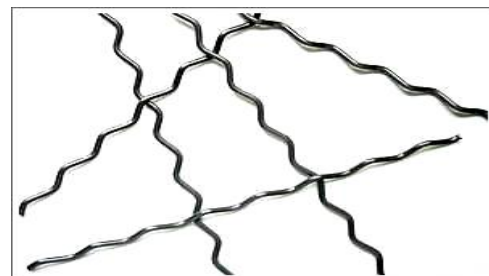
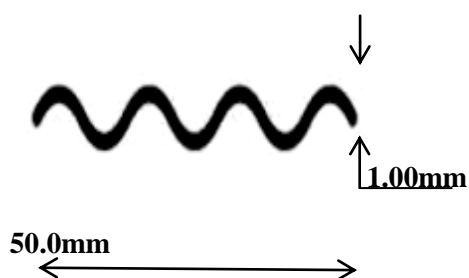


Figure V.6 Fibres en acier ondulées

Tableau V.11 Dimension des fibres ondulées

Dimensions	Caractéristiques
Longueur (droite)	100.0 mm (\pm 4 mm)
Diamètre	1.2mm (0.04mm)
Quantité	1040 g
Nombre d'ondulation	6
Masse volumique	7.85g/cm ³

V.4.2.3. Poids des fibres incorporés

Poids des différentes fibres, incorporées, dans une éprouvette en fonction de pourcentage choisis sont donnés au tableau V.12.

Tableau V.12 Poids des fibres par mètre cube du béton

Type de Fibre	Fibres plates	Fibres en acier ondulées
Masse g / M ³	200 ~ 320 g	200 ~ 320
Les pourcentages %	1% ~ 2%	1% ~ 2%

V.4.3. Formulation des fibres

On a deux pourcentages de fibres à utiliser:

a- Béton contient 1% (200g) de fibre métallique :

- Fibre en acier plate de longueur d'environ 50.0mm (\pm 3mm) et de 1.00mm de diamètre. (FMP)
- Fibre en acier ondulée de longueur d'environ 50.0mm (\pm 4mm) et de 1.00mm de diamètre. (FMO)

b- Béton contient 2% (320g) de fibre métallique :

- Fibre en acier plate de longueur d'environ 50.0mm (\pm 3mm) et de 1.00mm de diamètre. (FMP)
- Fibre en acier ondulée de longueur d'environ 50.0mm (\pm 4mm) et de 1.00mm de diamètre. (FMO)

V.4.4. Préparation du béton

La préparation de mélange a été faite selon des démarches :

- Sécher les constituants (sable, granulats, et ciment) (Photos V .11)



Photo V. 11 Séchage des échantillons dans l'étuve

- On introduit les constituants secs dans un malaxeur (Photo V.12) et ensuite on les malaxe pendant 50 secondes.
- On introduit aussi de l'eau puis on malaxe pendant 30 secondes, jusqu'à l'homogénéité de tous les constituants.



Photo V.12 Préparation de béton

- On introduit les fibres en dernière étape par des petites quantités pour ne pas les déformer
- Un malaxage pendant 15 secondes pour chaque ajout des fibres (Photo V. 13).



Photo V.13 béton à des fibres métalliques

V .5. Les étapes de confection des éprouvettes

Pour les essais de compression et de traction (essai brésilien) les moules utilisés de formes cylindrique normalisées (16*32) cm selon la norme NF EN 12390-3 de Février 2003.

On prépare 2 types de béton avec la même forme d'éprouvettes :

- ❖ Béton ordinaire sans fibres (béton témoin)
- ❖ Béton avec fibres métalliques de 2 formes (BFP et BFO).



Photo V.14 Les moules cylindriques (16×32) cm

- On remplit le mélanges dans les moules par la suite vibrer avec une boule pour faire remonter les bulles.

V .5.1. Conservation des éprouvettes avant le démoulage

On laisse le béton 24 heures dans les moules au niveau de laboratoires, ensuite les éprouvettes sont titrées et numérotées selon les conditions des fibres utilisées.



Photo V.15 Conservation des éprouvettes avant le démoulage

V.5.2. Conservation après démoulage

Après 24 heures les éprouvettes sont démoulées et plongées dans un bassin d'eau pendant une période de 28 jours.

Après le période de 24 heures on va sortir les éprouvettes du bassin avant le délai d'écrasement de 24 heures.



Photo V. 16 Démoulage des éprouvettes



Photo V.17 les éprouvettes dans le bassin d'eau

V.6. Les essais sur le béton frais et durcis

V. 6.1. Sur le béton frais

✓ cônes d'Abrams

Le moule de cônes d'Abrams conique de fond de 30 cm de hauteur, de 20cm de diamètre et sa partie supérieure est de 10 cm.

Pour mesure l'affaissement à la fin de mélange de béton, on prend le béton frais et traverser dans les moules cylindrique en 3 couches chaque couche recevant 25 coups de piquage ensuite araser le moule avec une tige et démouler immédiatement, enfin l'affaissement est la distance mesurée entre le sommet du cône et le haut du béton affaissé de Norme NF EN 12350-2.



Photo V. 18 l'essai du cône d'Abrams

On utilise le tableau ci-dessous pour déterminer la classe du béton testé :

Tableau V.13 Classement les affaissements du béton

Classe de consistance	Définition	Affaissement (mm)
S1	Béton très ferme	0 à 2
S2	Béton ferme	3 à 5
S3	Béton plastique	6 à 9
S3	Béton mou	10 à 13
S4	Béton très mou	13 à 15
S5	Béton fluide	≥ 16

a- Essai sur le béton ordinaire

L'affaissement $A = 8$ cm.

b- Essai sur le béton de fibre (les deux formes)

L'affaissement $A = 7$ cm.

Donc on a un **béton plastique** parce que l'affaissement est entre 6 à 9cm.

V .6.2. Sur le béton durci

V. 6.2.1. Essai de compression

L'essai de compression simple est réalisé au niveau de laboratoire de **LTPE** de Tebessa. Le but de cet essai est de déterminer la résistance à la compression à 28 jours selon la norme NF EN 12390-4.

Pour les plusieurs mélanges de béton, on a utilisé pour l'essai effectuer 5 éprouvettes.



Photo V.19 Machine de l'essai de compression

➤ **Mode opératoire de compression**

Tout d'abord il faut essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai. Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux. Puis positionner les éprouvettes de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage. Et il faut centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de 1 % de la dimension nominale de l'éprouvette cylindrique. Et enfin appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette, la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai.

➤ **Expression de résultat**

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante : $f_c = F/A_c$

Avec :

f_c : la résistance en compression, exprimée en MPa (Newtons par millimètres carrés)

F : la charge maximale, exprimée en N.

A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de l'éprouvette placée sur la machine, verticalement et bloquée par les deux plateaux, l'effort est appliqué progressivement à vitesse de chargement constante.



Photo V.20 La mise en place dans la presse

La machine subit une charge P jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



Photo V.21 La rupture de l'éprouvette

V. 6.2.2. Essai de traction (essai brésilien)

Cet essai de traction est réalisé au niveau de laboratoire de **LTPE** de Tebessa. L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant 2 génératrices opposées, entre les plateaux d'une presse. Le but de cet essai est de déterminer la résistance à la traction à 28 jours selon la norme NF P 18-408.

Pour les plusieurs mélanges de béton, on a préparé 5 types d'éprouvette.

➤ Mode opératoire de traction

Les précautions suivantes doivent être prises contre la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles sont sorties du local de conservation jusqu'au moment de l'essai.

a) Transporter les éprouvettes de la salle de conservation à la salle d'essais peu de temps avant l'essai, juste le temps nécessaire aux opérations préparatoires.

b) Si l'éprouvettes conservées dans l'eau il faut retirer de l'eau une à une chaque éprouvette de la série, l'essuyer, la peser, la mesurer éventuellement et, si nécessaire, déterminer les génératrices de chargement.

c) Eprouvettes conservées en sachets de polyéthylène

Transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essai, sortir une à une chaque éprouvette du sachet, enlever le produit de cure qui serait en excès et continuer les opérations préparatoires.

➤ **Expression de résultat**

Il faut retenir pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et de calculer la contrainte correspondante,

$$T_{\text{fendage}} = (0.637F) / (ah),$$

Avec

F : la charge de rupture en déca newtons,

a : le diamètre de l'éprouvette

h : la hauteur (normalisés ou effectifs) exprimés en centimètre



Photo V.22 La mise en place de l'éprouvette dans la machine



Photo V.23 La rupture de l'éprouvette

Conclusion

Pour que les essais effectués au laboratoire soient représentatifs de la qualité réelle du béton, il convient de respecter l'ensemble des procédures décrites dans les normes soit pour les constituants du béton ou pour les modes opératoires de tous les essais effectués.

Après la présentation et la détermination des caractéristiques des constituants et les essais effectués sur les matériaux utilisés, on présente dans le chapitre suivant l'analyse et les interprétations des résultats obtenus.

Chapitre VI

Résultats et interprétations

Résultats et interprétations

VI.1. Introduction

Ce chapitre sera le lieu pour nous de présenter les différents résultats obtenus d'essais de compression et de traction sur des éprouvettes de béton, de procéder à une analyse des résultats dans le but de vérifier l'influence sur la résistance à la compression, sur la résistance à la traction des bétons fibrés selon deux formes différentes (fibre plate et fibre ondulée) et selon deux pourcentages (1 % et 2 %). Dans ce chapitre nous essayons de faire ressortir les implications théoriques et pratiques des résultats, de formuler les limites et les faiblesses, et ainsi les difficultés rencontrées.

VI.2. Résultats

VI.2.1. Résistance à la compression

Le tableau VI.1 présente la résistance à la compression sur des éprouvettes cylindriques des bétons témoins (sans fibres) et des bétons fibrés préparés avec des fibres d'acier (plates et ondulées) et aussi avec deux pourcentages (1 % et 2%).

Tableau VI.1. Résistance à la compression des bétons témoins et des bétons fibrés (fibres d'acier plates et ondulées) avec deux pourcentages (1 % et 2 %)

Béton	Caractéristiques	
	Résistance à la compression (MPa)	
	28 jours	
	1 %	2 %
BT	25.50	
BFP	23.7	33.34
BFO	26	34

Le béton témoin est un béton de référence (sans fibre), sert comme formulation de base pour les autres compositions des bétons fibrés. Nous avons obtenu un bon étalement du béton frais

durant l'essai de l'appréciation de l'ouvrabilité, ce qui dénote le bon choix des matériaux, et confirme aussi la bonne consistance du béton.

La figure VI.1 présente l'évolution de la résistance du béton témoin (béton de référence) à la compression.

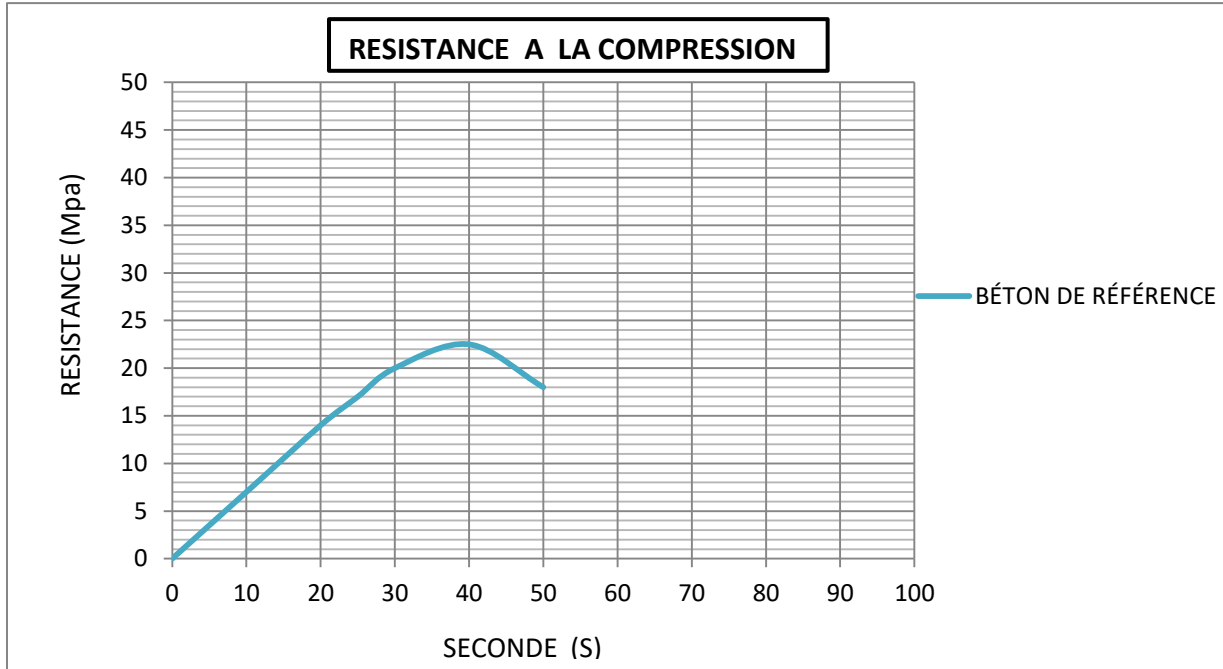


Figure VI.1 Résistance à la compression du béton témoin (Béton de référence)

D'après les résultats obtenus (figure VI.2), on remarque que l'ajout de fibre métallique plat de 1% permet une légère augmentation de la résistance mécanique à la compression. On remarque une dégression de la résistance avec la diminution de pourcentage de fibre.

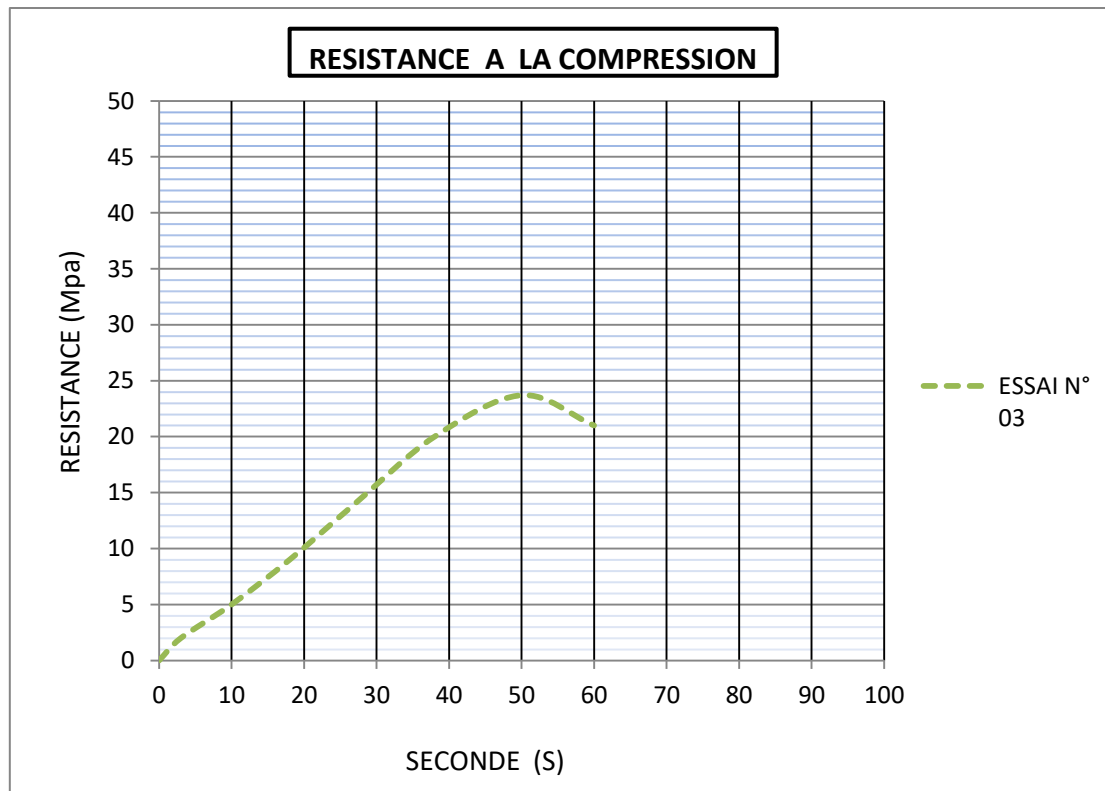


Figure VI.2 Résistance à la compression (BFP de 1 %)

La figure VI.3 montre les valeurs de la résistance à la compression du béton fibré (BFP de 2%). Selon la courbe on observe une grande augmentation de la résistance mécanique avec l'âge de (28 jours) par rapport aux bétons de référence.

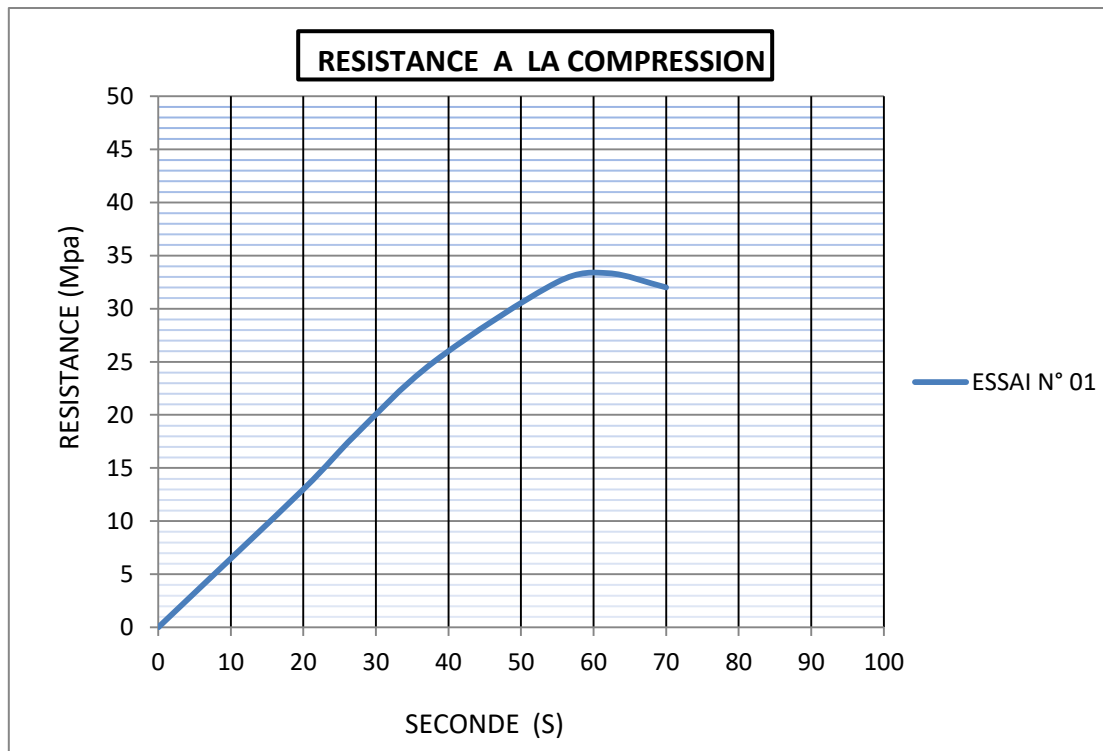


Figure VI.3 Résistance à la compression (BFP de 2 %)

La figure VI.4 présente la résistance à la compression du béton fibré (BFO 1 %). On peut remarquer que la résistance augmente rapidement en fonction de pourcentage des fibres incorporées.

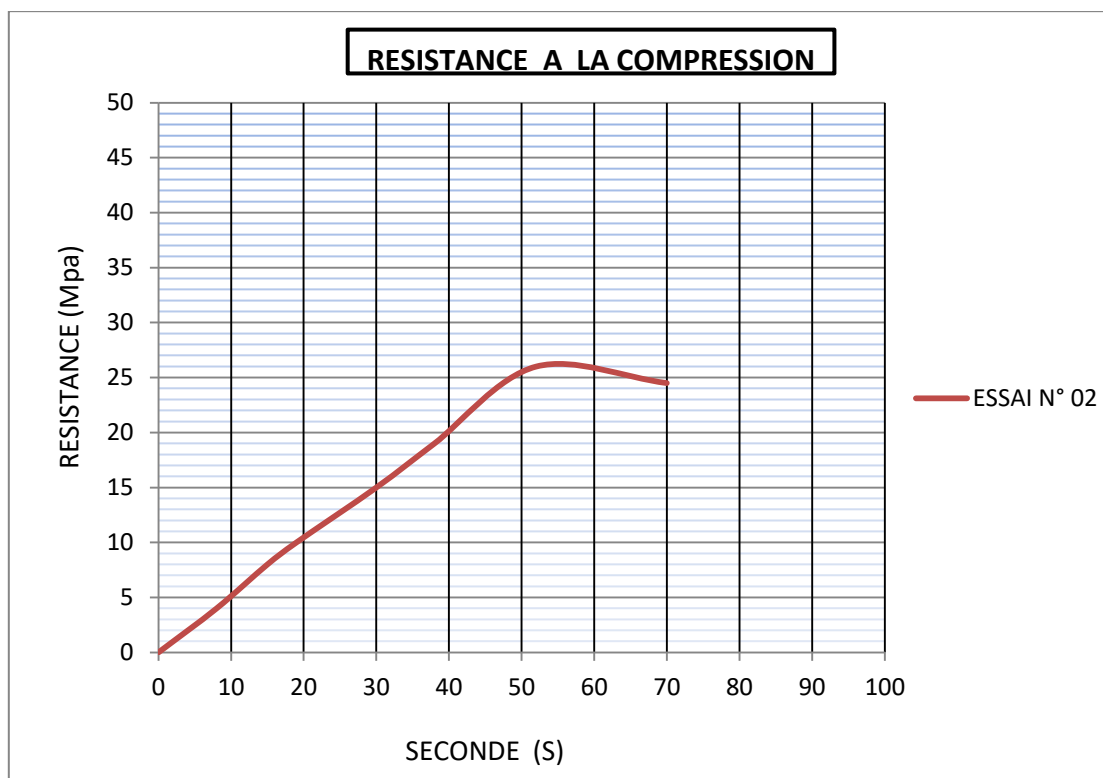


Figure VI.4 Résistance à la compression (BFO 1%)

Sur la figure VI.5 on constate que l'augmentation de pourcentage des fibres provoque une grande augmentation de la résistance à la compression par rapport au béton de référence.

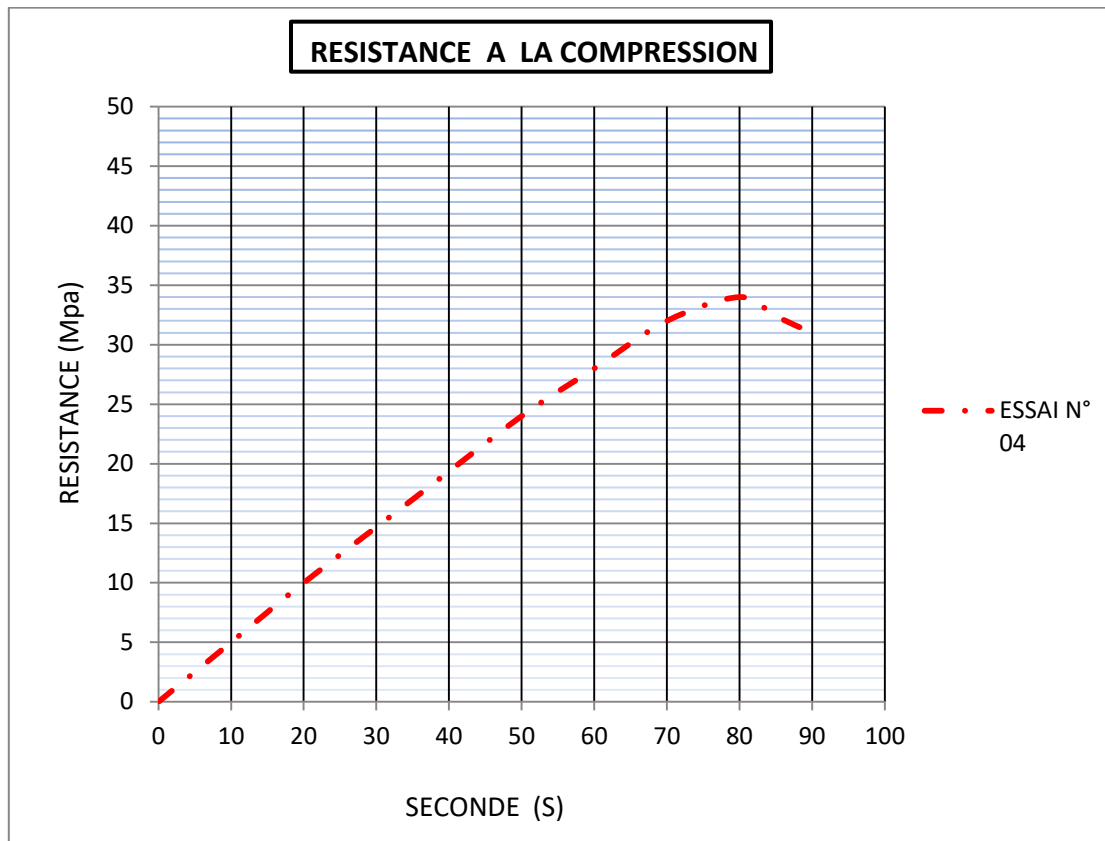


Figure VI.5 Résistance à la compression (BFO de 2 %)

La figure VI.6 résume les différents résultats de compression obtenus pour le béton témoin et les bétons fibrés avec les deux formes géométriques des fibres et aussi en fonction du pourcentage de fibres en acier. Dans cette figure on peut remarquer facilement l'influence des fibres sur la résistance à la compression du béton surtout pour un pourcentage d'ajout de 2 %.

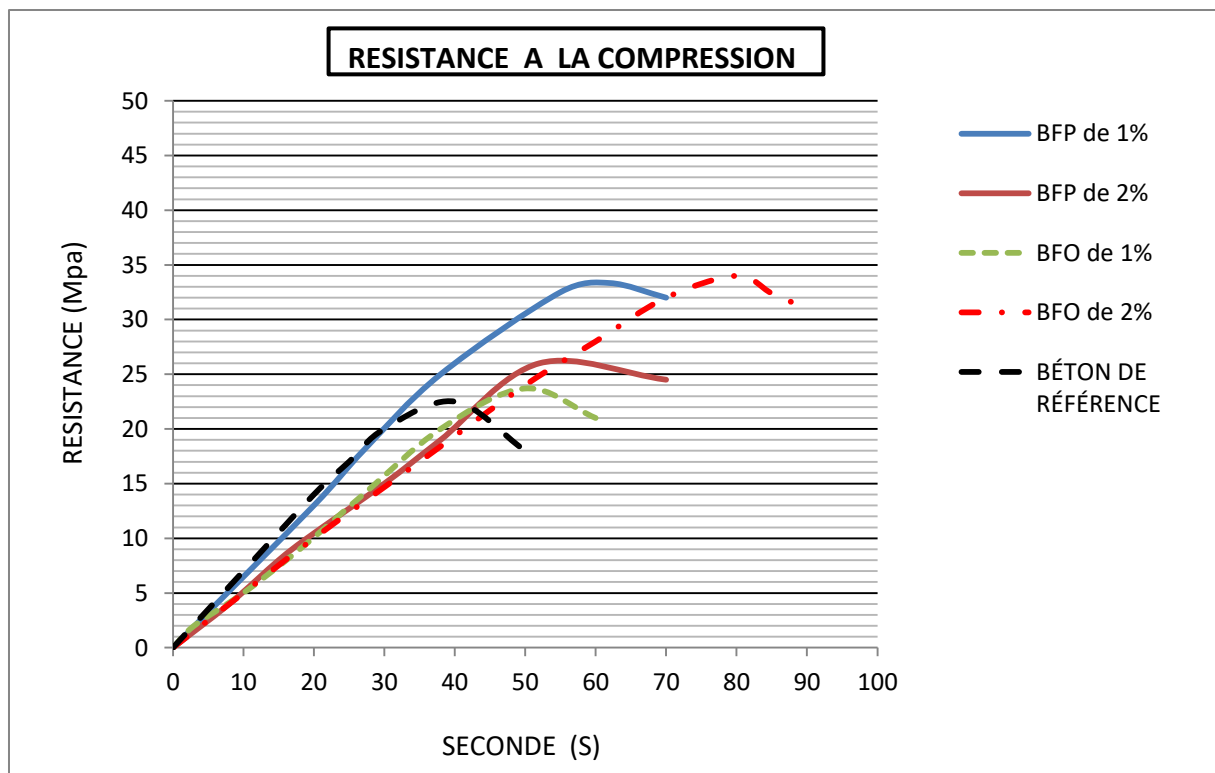


Figure VI.6 Evolution de la résistance à la compression de béton témoin et des bétons fibrés en fonction de forme et de pourcentage

VI.2.2. Résistance à la traction

Le tableau VI.2 donne la résistance à la traction appliquée sur des éprouvettes cylindriques du béton témoin et des bétons fibrés préparés avec des fibres d'acier en deux formes géométriques (plates et ondulées) et avec deux pourcentages (1 % et 2%).

Tableau VI.2 Résistance à la traction des éprouvettes en béton témoin et bétons fibrés (fibres d'acier plates et ondulées) avec deux pourcentages (1 % et 2 %)

Béton	Caractéristiques	
	Résistance à la traction (MPA)	
	28 jours	
	1 %	2 %
BT	1.52	
BFP	2.12	2.29
BFO	2.17	3

La figure VI.7 présente l'évolution de la résistance mécanique à 28 jours à la traction des éprouvettes cylindriques de béton sans addition (béton témoin). C'est une formulation de base par rapport aux autres bétons fibrés BFM. L'augmentation de la résistance à la traction n'est pas très remarquable à cause de bulles d'air piégées dans le béton lors du malaxage.

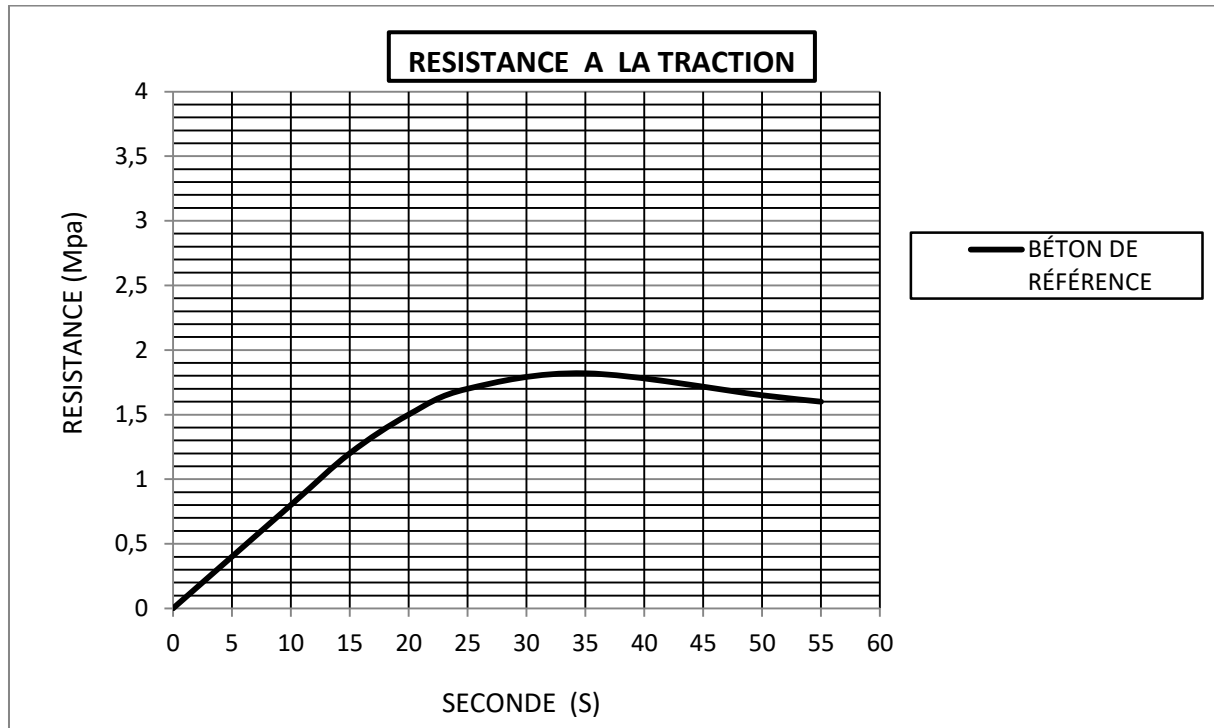


Figure VI.7 Résistance à la traction du béton (béton de référence)

D'après la courbe de la figure VI.8 on constate que l'augmentation de la résistance à la traction du BFP de 1 % est, légèrement, faible par rapport au béton témoin.



Figure VI.8 Résistance à la traction (BFP de 1 %)

La figure VI.9 représente l'évolution de la résistance à la traction du BFP avec 2%. Le résultat de traction du béton avec 2% de fibre est plus proche au résultat de la traction avec 1% de fibre plate mais le temps d'évolution est plus grand.

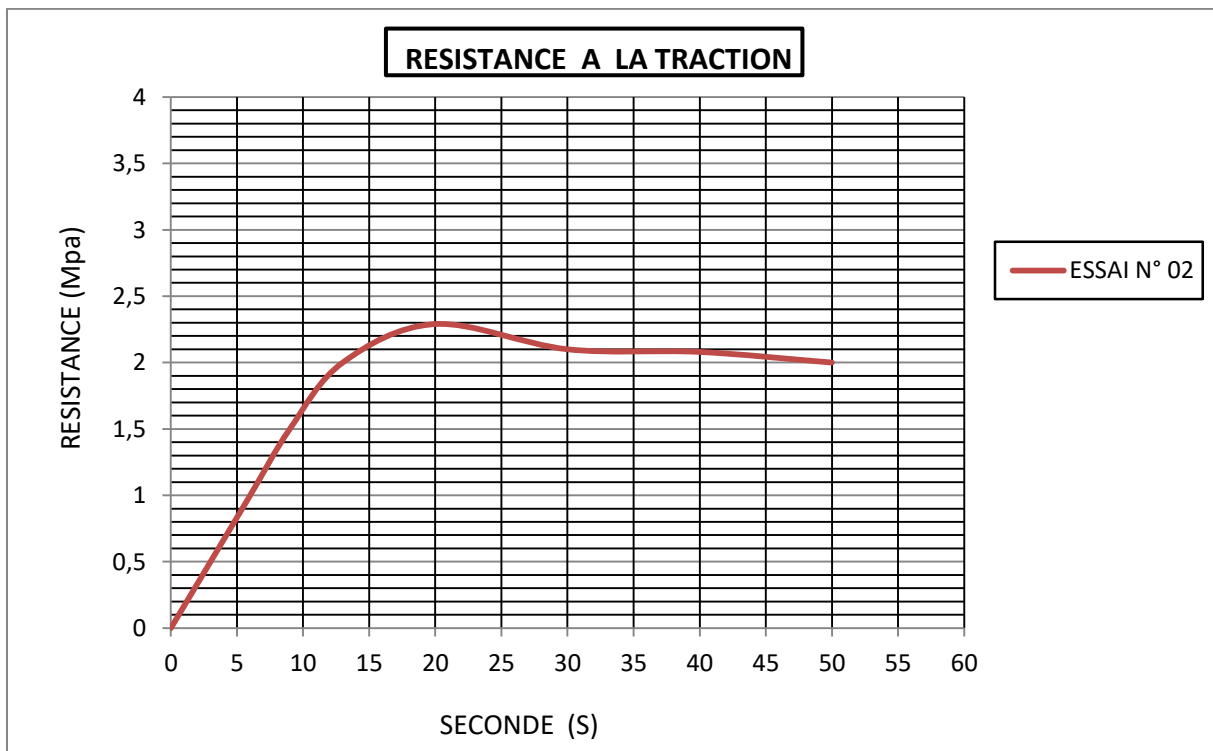


Figure VI.9 Résistance à la traction (BFP de 2 %)

On constate que la valeur de la résistance à la traction du BFO de 1 % donné à la courbe de la figure VI.10 est proche de la résistance à la traction du béton BFP (1% et 2 %).

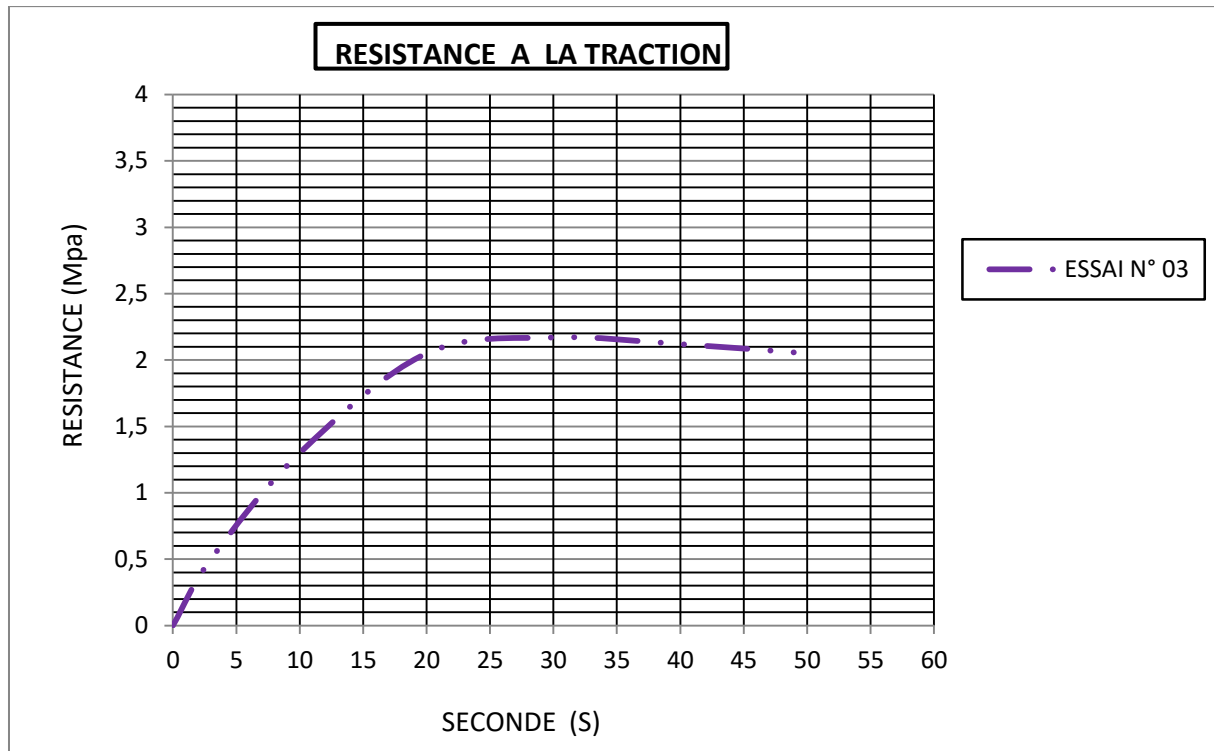


Figure VI.10 Résistance à la traction (BFO de 1 %)

La courbe de la figure VI.11 présente le résultat de l'essai de résistance à la traction du BFO de 2 % un peu élevé par rapport au béton témoin.

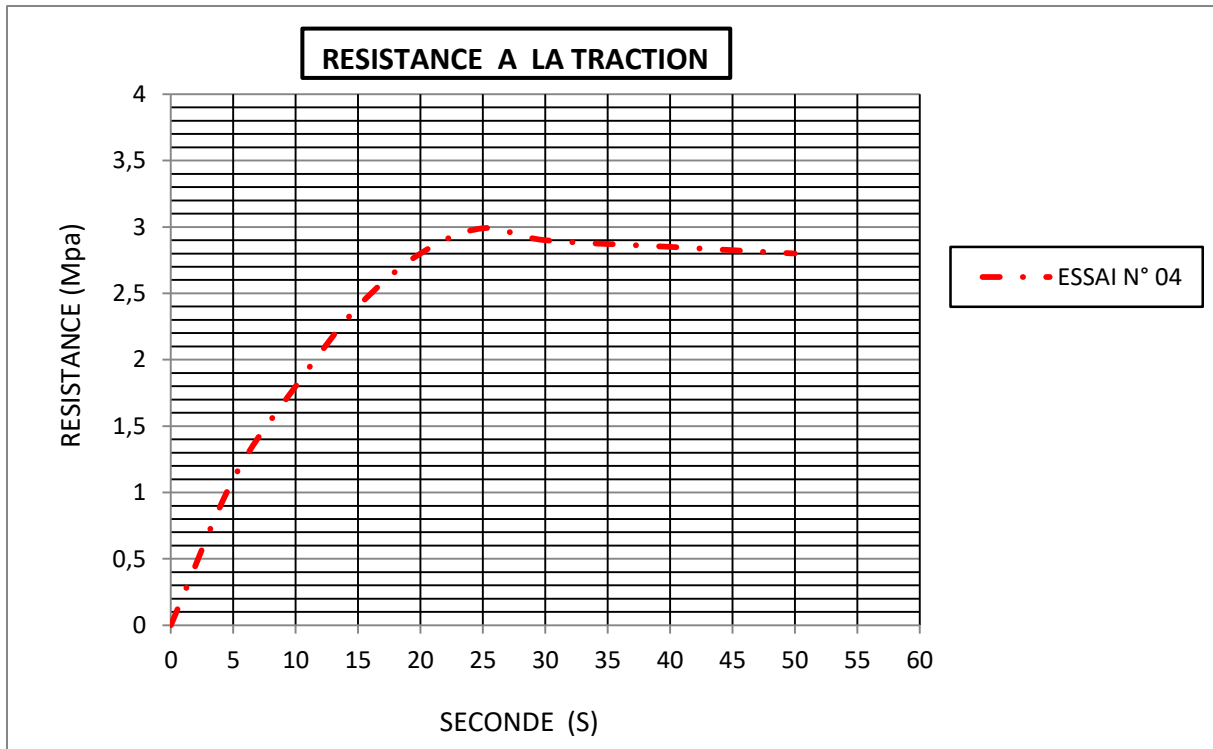


Figure VI.11 Résistance à la traction (BFO de 2 %)

La figure VI.12 résume les différents résultats de la résistance à la traction obtenus en fonction de deux formes géométriques de fibres et en fonction de deux pourcentages de fibres en acier ajoutées aux éprouvettes de béton.

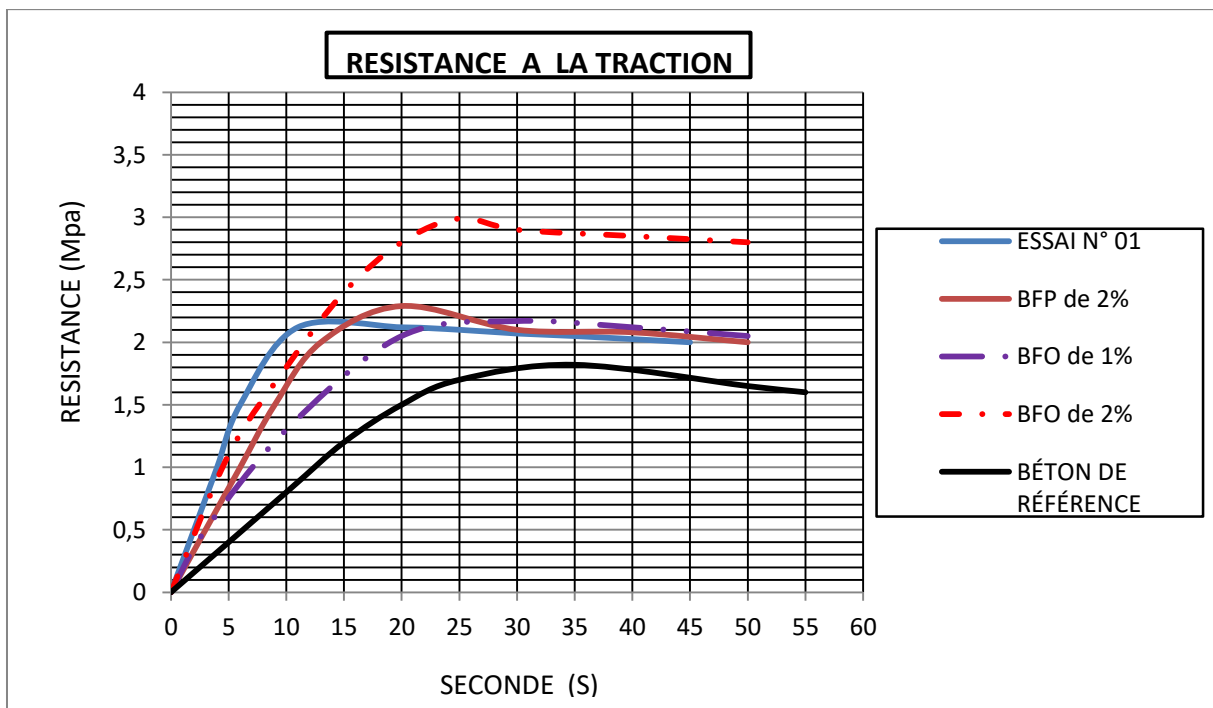


Figure VI.12 Révolution de la résistance à la traction de béton de fibre en fonction de forme et de pourcentage de fibres

VI.3. Interprétation des résultats

VI.3.1. Essais de compression

D'après les résultats obtenus on peut remarquer une grande amélioration de la résistance mécanique à la compression des éprouvettes après l'ajout des fibres par rapport aux bétons témoins.

Les résultats obtenus pour les bétons fibrés avec des fibres plates ne montrent pas une différence remarquable par rapport aux résultats tirés de la compression des éprouvettes en béton avec des fibres ondulées.

Ce qui explique que la résistance mécanique à la compression est très liée à la nature de fibre, la distribution des fibres dans l'éprouvette, aussi à l'adhérence entre les fibres et le béton et ainsi à la forme de l'extrémité de fibres (avec des crochets).

VI.3.2. Essais de traction

L'analyse des résultats obtenus lors des essais de traction nous conduit à remarquer une légère amélioration de la résistance mécanique à la traction des éprouvettes de béton fibré.

La résistance à la traction a été, légèrement, amélioré avec l'ajout des fibres ondulées surtout le pourcentage de 2% qui donne une résistance remarquable par rapport aux bétons avec l'ajout de même fibre mais avec un pourcentage de 1%.

Une légère différence entre les valeurs de la résistance à la traction du béton renforcé avec des fibres plates et du béton renforcé avec des fibres ondulées. Ce qui explique que l'amélioration de la résistance à la traction dépend de la nature de fibre et la distribution des fibres et aussi l'adhérence ainsi de géométrie de fibres (les fibres ancrées donnent une meilleur résistance).

On peut observer que le béton à fibre ondulée donne une meilleure résistance par rapport au béton de fibre plate. Et aussi le pourcentage de fibre incorporée joue un rôle important pour modifier la matrice de béton et améliore la ductilité.

La diminution de la résistance à la traction est due à la mise en œuvre du béton (existence de bulles d'air) et de la machine d'essai et à l'absence de malaxeur.

On peut ajouter aussi que l'amélioration de la résistance à la traction dépend aussi à la dimension de fibre (plus mince donne une grande résistance), et à la distribution homogène des fibres dans le mélange de béton.

Conclusion

Ce chapitre est consacré aux résultats obtenus des essais sur des bétons fibrés et leurs interprétations. Alors on peut conclure que :

- L'ajout de fibres au béton influe positivement sur sa résistance mécanique, et l'incorporation des fibres d'acier améliore la performance du béton ;
- l'utilisation des fibres métalliques améliore la ductilité, et augmente la résistance mécanique en fonction de la nature des fibres, la quantité, l'efficacité, et la géométrie (taille des granulats et la géométrie de fibre) ;
- La condition la plus importante pour que le béton fibré donne des bonnes résistances est d'assurer une distribution uniforme des fibres dans le mélange du béton d'une manière homogène, mais si la distribution n'est pas uniforme alors il apparaît une diminution de maniabilité et une augmentation des volumes des vides dans le mélange.

Conclusions Générales
Et Perspectives

Conclusions Générales et Perspectives

Conclusions Générales

Le renforcement des bétons par des fibres est devenu, actuellement, l'une des solutions techniques qui assurent une amélioration de certaines caractéristiques du béton. Dans cette présente étude, nous avons essayé, de déterminer l'effet d'un renforcement en fibres métalliques sur la résistance mécaniques des bétons fibrés. La recherche bibliographique nous a permis, également, de bien connaître les différents types de fibres utilisées pour le renforcement du béton. Ces fibres, en fonction de leur nature ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon, de ce fait, leur influence sur le béton peut varier.

Cette étude a été pour nous d'une part l'occasion de tirer profit de l'expérience de gens du terrain, et d'autre part de bien maîtriser, les essais de laboratoire de génie civil.

L'analyse des résultats obtenus a permis de tirer certaines conclusions:

- 1- une étude expérimentale sur les bétons fibrés demande la maitrise des essais, la qualité de constituants du béton et des fibres, et surtout la fiabilité des instruments de mesure,
- 2- La formulation d'un béton fibré est une opération difficile, donc un travail dans ce sens constitue une tentative intéressante du point de vue technologique.
- 3- l'utilisation des fibres aux bétons améliore d'une manière acceptable : l'ouvrabilité du béton frais, sa résistance à la compression et à la traction.
- 4- L'augmentation du pourcentage de fibres utilisées dans le béton améliore la résistance mécanique.
- 5- l'effet de la géométrie des fibres métalliques utilisées (plates ou droites et ondulées ou crêpées) sur l'ouvrabilité, et la résistance mécanique à la compression et à la traction n'est pas remarquable ;
- 6- Réduction remarquable de la largeur des fissures dans les éprouvettes testées ;
- 7- Les causes probables de ne pas avoir des résultats plus importants :
 - la surface des fibres (très lisse), et les bouts de fibres sont simples (pas de crochets)
 - l'orientation des fibres au sein du béton par rapport au sens de fissuration ;
 - distribution aléatoire et non homogène des fibres dans les éprouvettes testées.

Perspectives

Les perspectives envisageables pour améliorer la résistance du béton fibré à la traction

- Utilisation des fibres métalliques plus minces ;
- De bien étudier la répartition (distribution) des fibres dans le dosage ;
- Utilisation des types des fibres qui présentent une surface rugueuse pour améliorer l'adhérence.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] **Pliskin L.** “Propriétés des bétons (partie le béton) », Edition Eyrolles 2000 .p.58.
- [2] **CIMBETON.** “Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", 2006. Paris.
- [3] **Ouchi M.** “State-of-the-art report on self-compactabilityevaluation”, Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, 1999 pp. 111-120.
- [4] **Encyclopédie** “Définition du béton" Article extrait de l'Encyclopédie Encarta 2005.
- [5] **Cours de MDS.** “Les granulats". Université Ferhat Abbas. Sétif p.1.
- [6] **BASF** “ Technologie de béton ". Construction Chemicals France, 2001
- [7] **Jean-Luc A.** “Les matériaux de voirie : Les granulats ", novembre 2016.
- [8] **Kherbache S.et Goujil R.** “ Etude de l'influence de fins contenues dans les sables concassés sur la résistance des bétons ". Mémoire de fin d'études en Génie Civil. Université de Bejaia, 2014.
- [9] **Benamrane D.Z.** “ L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton ". mémoire de Master, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2017.p.5.
- [10] **Baron J., et Olivier J.P.** “ Les bétons bases et données pour leur formulation". Edition EYROLLES, 1999.
- [11] Disponible sur : [www.guide béton.com/eau gâchage](http://www.guide beton.com/eau gâchage) (consultée le 30-01-2020)
- [12] **Dupain R., Lanchon R., Arroman J.C.** “Granulats, sols, ciments et bétons". Edition Casteilla, 2004, 236 p.
- [13] **Nguyen T.L.H.** “Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons", Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre 2007, 139 p.
- [14] **Turcy P.** “ Retrait et fissuration des bétons autoplaçant – Influence de la formulation ". Thèse de doctorat en Génie Civil Ecole. Centrale de Nantes, Université de Nantes, 2004.
- [15] **Chaib S. Lassoued R.** “Apport des fibres sur les caractéristiques du béton autoplaçant durci. Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetic and Pollution ICEMAEP2016, October, 2016, Constantine, Algeria
- [16] **DGM** “Les béton à hautes per formances". In DGM09/UMBB 2011-2012
- [17] **Bruno Caillard.** “Le grand guide de la maçonnerie". BILP, France

Références bibliographiques

- [18] Disponible sur : [www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction et travaux public-th3](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-public-th3) (consultée le 02-02-2020)
- [19] **INFOCUMENTS**. "La base documentaire de référence sur les bétons et les ciments."
- [20] **Cours de Génie Civil**. "Notion de préfabrication dans la construction. In modulation de construction/préfabrication", Académie pro. Tunisie.
- [21] Disponible sur : [www.mekacoucretplants/le béton compacte-au rouleau-bcr](http://www.mekacoucretplants/le-béton-compacte-au-rouleau-bcr) (consultée le 02/02//2020)
- [22] **BILP** "Le guide pour faire comme un PRO. In le guide maçonnerie BILP".
- [23] Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/béton de terre](https://fr.wikipedia.org/wiki/béton_de_terre) (consultée le 02/02/2020)
- [24] **VICAT**. "Les propriétés de base de prise et durcissement".06-2011, France
- [25] www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments (consulté le 04/02/2020)
- [26] **Holcim**. "Guide pratique du béton. In concevoir et mettre en œuvre des bétons durables". Suisse 6^{ème} édition, 2015.
- [27] **Laldji S**. "Caractéristiques fondamentales du béton" Cours-ETS hiver 2015, Canada.
- [28] **Proviteq** "Fabrication du matériel du laboratoire". France
- [29] **Toutlemonde F. et Resplendino Wiley J**. "les bétons : formulation-fabrication et mise en œuvre, Tome2, collection technique cimbéton, centre d'information sur le ciment et ses applications, paris, 2013.
- [30] **Fares H**. "Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons Autoplaçants exposés à une Température élevée", Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise Décembre 2009,
- [31] **Benali R**. "Etude du comportement mécanique et Rhéologique de la pate du ciment, mortier et Béton avec différentes fibres", mémoire de magister, université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [32] **ACI COMMITTEE 544**, "State of the art report on fibre-reinforced concrete "- Am.Conc Ins.Proc Vol 70, N° 11; pp.729-744, November 1973
- [33] **SACI. R** . "Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton", mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf Msila, 2004
- [34] **Moktari A**. "influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier", Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah Ouargla, 2006.

- [35] **Ramezianpour A. Esmaceli M. Ghahari S. A. et Najafi M. H.**, “Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers”, *Construction and Building Materials*, 44; pp. 411–418, 2013.
- [36] **LAFARGE**, *Le béton et la démarche HQE*.
- [37] **Ait Ameer M.M.** "Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales. Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.
- [38] **Debicki G.**, "Contribution à l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les critères de résistance et la fissuration des matériaux", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France, 1988.
- [39] **Bouzeroura M.** "Etude du comportement du béton de fibres ondulées. Proposition d'une relation simplifiée contrainte-déformation", Mémoire de Magistère, Université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [40] **Bledzki, A. K et GASSAN. J.**, “Composites reinforced with cellulose based fibers”, *ELSEVIER, Progress in polymer science*, volume 24, pp.221-274, 1999.
- [41] **Casanova P., Lemaou F., Schaller I.** "Les fibres d'acier peuvent-elles remplacer les armatures transversales dans les poutres de béton armé", *bulletin de liaison L.C.P.C, N° 195* Jan.-Fev, 1995.
- [42] **Bendjillali K.** " Étude de l'influence du renforcement fibreux en polypropylène sur les performances physicomécaniques et sur la durabilité des mortiers de ciment a base de sable calcaire", Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2015.
- [43] **ASB.** "Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton", *Association du béton Québec, Canada*, 2005.
- [44] **Fritih Y.** "Apport d'un comportement d'élément en béton autoplaçant armé ". Thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [45] **Boukhatem F., Fergani M.A.** "Etude expérimentale du recyclage des débris de maçonnerie dans les mortiers de ciment", *Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique. Alger*, 2006.
- [46] **Rossi .P, Harrouche, N, Lemaou .F,** "Comportement Mécanique des Bétons de Fibres Métalliques utilisés dans les Structures en Béton Armé et en Béton précontrainte". *Annales de l'ITBTP, Série Matériaux 73, n°479 bis*, 1989. pp. 166-183

- [47] **Gopalaratnam V.S. et Shah S.P.** "On the Modelling of Inelastic Interfaces in Fibrous Composites". Symposium R – Bonding in Cementations Composites S. Mendes, S.P. Shah, Volume 114 – 1987.
- [48] **ABQ** "Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton", Association béton Québec, 2005 canada.
- [49] **Rossi P.** "Fibres métalliques ou fibres synthétiques ?", Laboratoire Central des Ponts & Chaussées revue tunnels et espace souterrain - n°218 - Mars/Avril 2010.
- [50] **Rossi. P.** "Tunnels et Espace Souterrain, Revue Béton" n°218, Avril 2010. pp. 154- 154
- [51] **Mehta P.K.**, "Concrete: structure, properties, and materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986, 450p.
- [52] **Aissoug I.**, "Les matériaux innovants dans la construction ", Mémoire de Master, Université L'Arbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghie, 2019.
- [53] **Makhlouf N.**, " Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton arme de fibres en copeaux", Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.
- [54] **Mehta P.K.**, " Concrete: structure, properties, and materials ", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986, 450p.
- [55] **Lankard D.R. & Sheets H.D.**; "Use of steel wire fibres in refractory Concrete". Concrete published in American Ceramic. Society Vol 50, No.5 1971.
- [56] **Adjrad A.**, "Renforcement du béton par des copeaux métalliques, étude expérimentale et modélisation", Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2000.
- [57] **Bouheraoua A.**, "Effets des fibres bi-ondulées sur le comportement du béton, étude expérimentale", Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2006.
- [58] **Benali R.**, « Etude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte de ciment, mortier et béton avec différentes fibres, Mémoire de magister .Université Mohamed Khidr de Biskra.2010.90p.
- [59] **Boufedah Bdissi A.**, "Influence de la granularité (classe granulaire 4/22,4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires". Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine, 2011, p.29.
- [60] **Lanchon R.**, "Granulats, béton, sols : Cours de laboratoire ". Editions Desforges. 1977.

Annexe

Annexe 1: Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (25 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 63 mm)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Annexe 2 : Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	< 10

Annexe 3: Valeur du terme correcteur K

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

NOTA 1 : Correction supplémentaire K_p :

Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_p = 6 M_{\square} \square 15$ (M_{\square} étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

NOTA 2 : Correction supplémentaire K_p :

Si la qualité du béton est précisée « pompable », il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courant ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur

$K_p = + 5$ à 10 environ, selon le degré de plasticité désiré.

Annexe 4: Coefficients de compacité du béton

Consistance	Serrage	coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

NOTA : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon, il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0,01
- sable et gravier concassé = - 0,03