


<p>Université Hassiba Ben Bouali de Chlef</p> <p>Faculté de Génie Civil et d'Architecture</p>		<p>جامعة حسيبة بن بوعلي</p> <p>كلية الهندسة المدنية و</p> <p>الهندسة المعمارية</p>
---	---	---

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Mémoire de Magistère

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et géotechniques

Thème :

*Impact de L'ajout des fibres métalliques sur la résistance
des structures en béton à haute performance*

Présenté par :

BERRADIA Mohammed

Soutenu publiquement le 12 Avril 2012 devant les membres du jury :

- BRANCI Tayeb, (Maître de Conférences de Classe 'A', Université de Chlef) Président
- KADRI Tahar, (Maître de Conférences 'A', Université de Mostaganem) Examineur
- EZZIANE Karim, (Maître de Conférences de Classe 'A', Université de Chlef) Examineur
- SETTI Bakhti, (Maître Assistant de Classe 'A', Université de Chlef) Examineur
- MAKHELOUF Ali, (Maître de Conférences de Classe 'A', Université de Chlef) Rapporteur

Remerciements

Louange et le grand remerciement a Allah qui nous a donné la santé, la sagesse et le pouvoir de faire ce travail.

Et bien sûr, je tiens à adresser mes remerciements et exprimer mes reconnaissances à mon promoteur Dr MAKHELOUF ALI, qui a accepté de diriger mes travaux.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à :

- Tous les enseignants du magistère option Structures et Géotechnique Département de Génie Civil : Dr A. MAKHELOUF, Dr T. BRANCI, Dr B. LAMRI, Dr A. KASSOUL, Dr A. ARABE, Dr Tahar ABBAS.*
- A madame ISABELLE GAUTHERON, la directrice de la bibliothèque centrale de l'école nationale des ponts et chaussées de paris qui m'a beaucoup aidé durant mon séjour à l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées en France.*
- A M^{lle} CHABAH SAMIA, Assistante Coordinatrice du BU, et la facturière CHERIGUENNE HAYAT de SIKA, qui m'ont beaucoup aidé et m'ont fourni tous les matériaux nécessaires pour faire mes essais.*
- A M. Saïd NOURI, chef de département de Génie Civil, qui m'a facilité l'accès au laboratoire MDC.*
- A tout les enseignants de l'institut de génie civil.*

Mes vifs remerciements sont adressés aux membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'assister et d'examiner mon travail de magistère.

En fin mes profonds remerciements et gratitude a ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ *Ma chère mère, symbole de tendresse, d'amour et de courage,*
- ❖ *Mon cher père que j'aime très fort,*
- ❖ *Mes chères sœurs et chers frères,*
- ❖ *Tous mes fidèles amis : A. BELRALI, A. BENBOUALI,*
M. ERRADIA, M. HANAOUI, H. BERRADIA,
A. BERRADIA, D. ADDA,
- ❖ *Tous les membres de la famille ERRADIA et surtout mon*
copin Omar,
- ❖ *Tous mes amis et tous les étudiants de magister de*
l'université de Chlef spécialité Génie civil.

BERRADIA MOHAMMED

RESUME

Depuis quelques années, on assiste à la création de nouveaux types de bétons tels que les bétons à haute performance caractérisés par leur forte résistance en compression (60 à 120 MPa) et une durabilité accrue. Ces bétons encore très récents font l'objet de nombreuses études. En effet, s'ils atteignent des très hautes résistances en compression et en traction, leur comportement à la rupture reste très fragile. On outre, la résistance à la traction reste aussi très faible. L'objectif de ce travail est de voir l'apport de l'introduction des fibres métalliques dans la matrice béton de point de vie résistance à différents âges. Des essais destructifs (compression, traction par flexion, traction par fendage), des essais non destructifs (sclérométriques, auscultations soniques) ont été effectués sur des éprouvettes de béton haute performance témoin (sans fibres métalliques) et de béton à hautes performances renforcé par des fibres métalliques. Les résultats de cette expérimentation montrent que l'ajout des fibres métalliques contribue à l'amélioration de la résistance à la traction par flexion et la traction par fendage; les fibres augmentent légèrement la résistance à la compression du BHP. Les résultats montrent aussi que l'ajout des fibres métalliques augmente légèrement la vitesse du son jusqu'à la fraction 1%, au delà de 1%, l'ajout des fibres diminue la résistance à la compression et la vitesse du son pour un dosage de 1,5% de fibres métalliques.

Mots clés : Béton à haute performance, fibres métalliques, compression simple, traction par flexion, traction par fendage

ABSTRACT

In recent years, there has been the creation of new types of concrete such as high performance concretes characterized by their high compressive strength (60 to 120 MPa) and durability. These concretes are still very recent subject of many studies. Indeed, if they reach the very high compressive strength and tensile behavior at break remains very fragile. It addition, the tensile strength is also very low. The objective of this work is to see the contribution of the introduction of metal fibers in the matrix concrete point of resistance at different life ages. Destructive testing (compression, tensile bending, tensile splitting), non-destructive testing (hammers, sonic auscultation) were performed on specimens of high performance concrete control (without metal fibers) and high-performance concrete reinforced with metal fibers. The results of this experiment show that the addition of steel fibers contributes to the improvement of tensile strength in bending and splitting tensile strength, the fibers slightly increased the compressive strength of HPC. The results also show that the addition of steel fibers slightly increases the speed of sound to the fraction 1% beyond 1%, the addition of fiber reduces the compressive strength and the speed of sound for a dosing 1.5% of metal fibers.

Keywords: High performance concrete, metal fibers, compressive, tensile bending, tensile splitting

ملخص

في السنوات الأخيرة، كان هناك أنواع جديدة من الخرسانة، مثل الخرسانة عالية الأداء التي تتميز بقوة الضغط العالي (60-120 MPa). في الواقع، هذه الخرسانة حديثة جدا لا تزال تخضع للكثير من الدراسات لأن سلوك الخرسانة عالية الأداء في الكسر هش للغاية. بالإضافة إلى ذلك فإن قوة الشد لا تزال منخفضة للغاية. الهدف من هذه الدراسة هو أن نرى مدى تأثير إضافة الألياف الحديدية للخرسانة عالية الأداء من ناحية المقاومة (الضغط، الانشطار، الانحناء)، وأجرينا تجارب المدمرة وغير المدمرة على عينات من الخرسانة عالية الأداء حاوية الألياف الحديدية بنسب مختلفة و الغير حاوية. نتائج هذه التجربة تبين أن إضافة الألياف الحديدية لحد 1,5% يزيد من مقاومتي الانشطار و الانحناء بشكل كبير بعمر 28 يوم. النتائج لمقاومتي الضغط وسرعة الصوت تبين أن إضافة الألياف الحديدية لحد 1% يزيد بنسبة قليلة من مقاومة الانضغاط وسرعة الصوت، أما إضافة الألياف الحديدية لحد 1,5% من الألياف الحديدية يخفض من مقاومة الانضغاط وسرعة الصوت مقارنة بالخرسانة الغير حاوية للألياف الحديدية.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة عالية الأداء، الألياف الحديدية، الانضغاط، الانحناء، الانشطار.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. BETON A HAUTE PERFORMANCE.....	4
1.1.1 Généralités.....	4
1.1.2. Les voies d'obtention des hautes performances	6
1.1.2.1. La défloculation des grains de ciment	6
1.1.2.2. L'extension du spectre du mélange granulaire	7
1.1.3. Formulation d'un BHP	8
1.1.3.1. Principe de formulation d'un BHP.....	8
1.1.3.2. Méthodes de formulation d'un BHP	8
1.1.3.2.1. Méthode de Dreux – Gorisse.....	8
1.1.3.2.2. Méthode de Baron - Lesage	8
1.1.3.2.3. Méthode de De-Larrad.....	9
1.1.4. Exemples de formulation d'un BHP.....	10
1.1.4.1. Pont de joigny.....	10
1.1.4.2. Pont de jonche.....	10
1.1.5. Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP.....	11
1.1.5.1. Influence du rapport E/C.....	11
1.1.5.2. Propriété des gros granulats.....	12
1.1.5.3. Influence du type de granulats.....	13
1.1.5.4. Influence du volume en gros granulats.....	15
1.1.5.5. Influence du dosage en ciment, dosage en adjuvant, rapport G/S.....	16
1.1.6. Les avantages des BHP.....	18
1.1.7. Domaine d'utilisation de BHP.....	19
1.1.7.1. Exemple d'application de BHP.....	19
1.1.7.1.1. Pont « Stichtse » au Pays-Bas.....	19
1.1.7.1.2. Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001).....	19
1.1.7.1.3. Plates-formes pétrolières en Norvège.....	20
1.1.7.1.4. La grande arche	20
1.2. BETON DE FIBRE.....	21
1.2.1 Définition de béton de fibres.....	21
1.2.2. Historique de l'utilisation des fibres.....	22
1.2.3. Différentes nature des fibres.....	23
1.2.3.1. Fibres minérales.....	23
1.2.3.2. Fibres végétales.....	23
1.2.3.3. Fibres synthétiques.....	23
1.2.3.4. Fibres artificielles.....	23
1.2.4. Critère de choix du type des fibres.....	25
1.2.5. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans le béton.....	26
1.2.6. Rôle des fibres.....	28
1.2.7. Fabrication et utilité des bétons de fibres.....	30
1.2.8. Précautions a respecter lorsque l'on utilise du béton de fibre	30
1.2.9. Orientation préférentielle des fibres.....	31
1.2.9.1. La technique de mise en œuvre.....	31
1.2.9.2. Effets liés à l'écoulement du BFM.....	32
1.2.10. Différents facteurs intervenant dans le comportement mécanique du BFM.....	32
1.2.10.1. Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques.....	32

1.2.10.2. Influence du pourcentage des fibres.....	33
1.2.10.3. Influence de la longueur de fibres.....	34
1.2.10.4. Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique du BFM..	35
1.2.10.5. Influence de la taille et la rugosité des granulats.....	36
1.2.10.6. Influence de l'adhérence fibres matrice.....	37
1.2.11. Comportement mécanique des bétons de fibres.....	37
1.2.11.1. Résistance en compression.....	37
1.2.11.2. Résistance en traction par flexion.....	41
1.2.11.3. Résistance en traction par fendage.....	42
1.2.12. Formulation des bétons de fibres.....	43
1.2.12.1. Description de la méthode.....	44
1.2.13. Les avantages du béton de fibres	46
1.2.14. Domaines d'application des BFM et BHPFM	47
1.2.14.1. Le domaine du bâtiment.....	47
1.2.14.2. Le domaine des travaux publics.....	48
1.2.14.3. Le domaine du Génie Civil autre que les bâtiments et les travaux publics..	49
1.2.14.4. Le domaine en de hors du Génie Civil.....	49
1.2.14.5. Cas particulier des bétons à ultra-hautes performances fibrés.....	49
1.2.15. Exemples d'application.....	50

CHAPITRE 2 : FORMULATION ET FABRICATION DU BETON A HUTE PERFORMANCE DE FIBRES METALLIQUES

2. MATERIAUX DE COMPOSITION DE BHP RENFORCER PAR DES FIBRES METALLIQUE.....	52
2.1. LES GRANULATS	52
2.1.1. Granulats fins	52
2.1.2. Granulats gros	53
2.1.2.1. Forme et taille.....	53
2.1.2.2. Résistance mécanique.....	53
2.1.2.3. Rigidité.....	53
2.2. CIMENT.....	53
2.2.1. HYDRATATION DU CIMENT.....	54
2.2.1.1. Hydratation des composants du ciment Portland.....	54
2.2.1.2. Hydratation du silicate tricalcique C_3S	55
2.2.1.3. Hydratation du silicate bi calcique C_2S	56
2.2.1.4. Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A	56
2.2.1.5. Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF	57
2.3. LES ADJUVANTS.....	57
2.3.1. Définition de superplastifiant.....	58
2.3.2. Description de superplastifiant.....	58
2.3.3. Mécanisme d'action de superplastifiant.....	60
2.3.4. Influence du dosage en superplastifiant.....	62
2.4. LES AJOUTS MINERAUX.....	64
2.4.1. Fumée de silice.....	64
2.4.2. Obtention d'un BHP a base de la fumée de silice.....	65
2.4.3. Mode d'action de la fumée de silice dans le BHP.....	65

2.4.3.1. Effet physique.....	66
2.4.3.2. Effet pouzzolanique	67
2.4.4. Avantages de la fumée de silice	68
2.5. LES FIBRES METALLIQUES.....	69
2.6. L'EAU DE GACHAGE.....	70

CHAPITRE 3 : ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. GENERALITES.....	71
3.2. METHODES D'ESSAIS.....	71
3.2.1. Essais sur granulats	71
3.2.1.1. Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650).....	71
3.2.1.1.1. Matériel pour l'analyse granulométrique.....	72
3.2.1.1.2. Description de la méthode.....	73
3.2.1.2. Essai d'équivalent de sable (NF P 18-597).....	73
3.2.1.2.1. Equipement pour équivalent de sable.....	74
3.2.1.2.2. Mode opératoire.....	75
3.2.1.3. Module de finesse (NF P 18-304).....	75
3.2.1.4. Masse volumique	76
3.2.1.5. Essai Los Angeles (NF P 18-573).....	76
3.2.1.5.1. Principe de l'essai.....	76
3.2.1.5.2. Mode opératoire.....	77
3.2.2. Essais sur béton frais.....	77
3.2.2.1. Mesure de l'affaissement (NF P 18-415)	77
3.2.2.1.1. Matériel.....	78
3.2.2.1.2. Mode opératoire.....	78
3.2.3. Essais mécaniques.....	79
3.2.3.1. Essais destructifs.....	79
3.2.3.1.1. Essai de compression (NF P 18-455).....	79
3.2.3.1.1.1. Mode opératoire.....	79
3.2.3.1.1.2. Appareil utilisé.....	80
3.2.3.1.2. Essai de traction par fendage (NF P 18-408).....	80
3.2.3.1.2.1. Mode opératoire.....	81
3.2.3.1.2.2. Appareil utilisé.....	82
3.2.3.1.3. Essai de traction par flexion (NF P 18-407).....	82
3.2.3.1.3.1. Mode opératoire.....	83
3.2.3.1.3.2. Appareil utilisé.....	84
3.2.3.2. Essais non destructifs	84
3.2.3.2.1. Essais sclérométriques (NF P.18-417).....	84
3.2.3.2.2. Essai auscultation dynamique (ULTRASON) (NF P 18-418).....	85
3.3. CRACTERISATION DES MATERIAUX.....	87
3.3.1. Matériaux utilise pour la confection des bétons utilises.....	87
3.3.2. Ciment.....	88
3.3.3. Ajout minéral (fume de silice).....	89
3.3.4. Superplastifiants.....	90
3.3.5. Fibres métalliques.....	90
3.3.6. Eau de gâchage.....	91

3.4. CONFECTION DU BETON.....	91
3.5. BETON A HAUTE PERFORMANCE ET BETON A HAUTE PERFORMANCE FIBRE.....	91
3.6. OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BHP.....	92
3.7. ÉVOLUTION DE LA COMPATIBILITE LIANT/SUPERPLASTIFIANT.....	93
3.8. PROCEDURE DE FABRICATION DES EPROUVETTES.....	97
3.9. CONTROLE SUR LE BETON FRAIS.....	97
3.10. CONFECTION DES EPROUVETTES.....	98
3.10.1. Type et tailles des moules.....	98
3.10.2. Remplissage des moules.....	98
3.10.3. Conservation des épreuves.....	99

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS & INTERPRÉTATIONS

4. PRESENTATIONS DES RESULTATS.....	100
4.1. RESISTANCES MECANIQUES.....	100
4.1.1. Résistance à la compression	100
4.1.2 Résistance à la traction par flexion, traction par fendage.....	106
4.1.3 Indice sclérométrique.....	116
4.1.4. Vitesse de propagation du son.....	118

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	123
---	------------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1.1: Mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 1.2: Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 1.3: Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 1.4: Propriété mécanique des granulats.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 1.5 : Relation entre la résistance en traction par fendage des bétons et des granulats.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 1.6 : Relation entre la résistance à la traction directe et le volume de granulats.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1.7: Evolution de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de ciment..</i>	<i>17</i>
<i>Figure 1.8: Le pont « Stichtse » au Pays-Bas.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 1.9: Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 1.10: Les tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001).....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 1.11: La grande arche</i>	<i>20</i>
<i>Figure 1.12 : Modèle de composite à base de fibres.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 1.13: Rôle des fibres dans la matrice de béton.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 1.14: Processus de fissuration du béton</i>	<i>27</i>
<i>Figure 1.15: Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure 1.16: Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure 1.17: Illustration de l'apport du renfort par des fibres</i>	<i>28</i>
<i>Figure 1.18: Principe de couture d'une fissure.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 1-19: Fonctionnement de la fibre à crochets.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 1.20: Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un BFM en fonction du pourcentage de fibre.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 1.21: Influence de la longueur des fibres sur la résistance à la traction par flexion.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 1.22: Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 1-23 Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 1.24: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 1.25: Courbe contrainte déformation en compression simple.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 1.26: L'influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression.....</i>	<i>39</i>

<i>Figure 1.27 : Résistance à la compression.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 1.28 : Courbe contrainte déformation des essais de compression faits sur des éprouvettes asservie.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 1.29: Effect of steel fibers on compressive strength at different curing ages.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 1.30: Allure de courbes charge-flèche.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 1.31: Effect of Steel Fiber Content on Flexural Strength of Concrete at Different Ages.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 1.32: Effect of Steel Fiber on Splitting Tensile Strength at Different Curing Ages.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 1.33: Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 1.34: Musée océanographique à Valencia.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 1.35: Tunnel de Barcelone.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 1.36: Eléments de toit en Italie.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 1.37: Shepherd's Gully Bridge, Australie.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure 2.1: CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O).....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 2.2- Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 2.3: Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de sels de sodium de poly-naphtalène sulfoné selon Rixom et Mailvaganam</i>	<i>58</i>
<i>Figure 2.4 : Représentation schématique d'une molécule d'un superplastifiant à base de poly-mélatamine sulfoné selon Dodson.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 2.5 : Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un superplastifiant, selon Jolicoeur & al.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 2.6 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant, selon Meyer.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 2.7 : Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m³ de ciment à maniabilité constante, selon Meyer.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 2.8 : Dispersion des grains de ciment par l'ajout du polymère.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 2.9 : Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule selon Jolicoeur & al.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 2.10: Illustration schématique de la répulsion électrostatique entre deux particules selon Jolicoeur & al.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 2.11 : Evolution de l'affaissement d'un BHP à base de deux types de ciment en fonction du temps pour 3 superplastifiants différents, selon kadri.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 2.12 : Relation contrainte de cisaillement – rapport de cisaillement des pâtes de ciment avec 1 % de superplastifiant MFS (a) et NFS (b), à différents temps d'introduction, selon Aiad</i>	<i>64</i>
<i>Figure 2.13: Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon Kwan.....</i>	<i>66</i>

<i>Figure 2.14: Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De larrad & al.....</i>	<i>67</i>
<i>Figure 2.15: Variation des résistances en compression des mortier en fonction du temps d'hydratation pour différentes teneurs en fumée de silice pour un rapport eau/liant de 0,5, selon Appe Rao.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 2.16: Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan.....</i>	<i>68</i>
<i>Figure 2.17: Types et formes de fibres d'aciers utilisées.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 3.1: Matériels pour l'analyse granulométrique.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 3.2: Essais d'équivalent de sable.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 3.3: Matériel pour l'essai équivalent de sable.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 3.4: Appareil Los Angeles.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 3.5: Cône d'Abrams.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 3.6: Machine d'essai de compression.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 3.7: Bande de chargement.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 3.8: Essai de fendage.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 3.9: Machine d'essai de flexion.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 3.10: Essai de flexion.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 3.11: Essai de flexion.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 3.12: Scléromètre.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 3.13: Ultrason.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 3.14: Essai auscultation sonique.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 3.15: Courbe granulométrique des granulats utilisés.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 3.16: Ciment de Chlef (CPJ CEM II/A 42.5).....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 3.17: Fumée de silice (Sika S 95 DP)</i>	<i>89</i>
<i>Figure 3.18: Superplastifiant (Sika viscocrete tompo 12).....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 3.19: Fibres métalliques.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 3.20: Matériels nécessaire pour l'essai cône de marsh.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 3.21 : Couple liant (CPJ42.5 +3% FS) – Sika viscocrète tompo 12.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 3.22: Malaxeur à béton.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 3.23: Affaissement au cône d'Abrams.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 3.24: Moules utilisés.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 3.25: Remplissage des moules.....</i>	<i>99</i>

<i>Figure 3.26: Conservation des éprouvettes.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 4.1: Résultats de l'évolution de la résistance en compression du BHP en fonction du temps (jours).....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 4.2: Effet du % des fibres métalliques sur la résistance à la compression du BHP durant la période de 28jours</i>	<i>103</i>
<i>Figure 4.3: Résultats de l'évolution de la résistance à la traction par flexion du BHP en fonction du temps (jours).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 4.4: Résultats de l'évolution de la résistance à la traction par fendage du BHP en fonction du temps (jours).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 4.5: Effet du % des fibres métalliques sur la résistance à traction par flexion durant la période de 28jours du BHP.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 4.6: Effet des fibres métalliques sur la résistance à traction par fendage durant la période de 28jours du BHP.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 4.7 : Indice sclérométrique du BHP en fonction de l'âge du béton.....</i>	<i>117</i>
<i>Figure 4.8 : Vitesse de son du BHP en fonction du temps (jours).....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 4.9: Influence du % des fibres sur la vitesse du son du BHP</i>	<i>120</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1: Les voies d'obtention des hautes performances.....</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 1.2: Formulation du BHP pour Pont de joigny (sans fumée de silice).....</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 1.3: Formulation du BHP pour Pont de jonche (avec fumée de silice)</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 1.4 : Influence du type de granulat sur les résistances mécaniques des bétons.....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 1.5: Compositions et propriétés des bétons.....</i>	<i>16</i>
<i>Tableau 1.6: Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 1.7: Définition de la formulation.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3.1: Propreté des sables.....</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 3.2: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 3.3 : Propriétés des granulats.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 3.4 : Composition chimique du ciment de Chlef.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 3.5: Données techniques de la fumée de silice.....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 3.6: Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant Sika viscocrete tompo 12.....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 3.7: Caractéristiques des fibres Dramix.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 3.8 Composition massique en Kg/m³ pour le BO de référence.....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 3.9: Composition massique finale en kg/m³ du BHP.....</i>	<i>95</i>
<i>Tableau 3.10 : Compositions massiques (Kg/m³) des bétons utilisé.....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 3.11: Propriétés à l'état frais des différentes formulations.....</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 4.1: Résultats des essais de compression des différents spécimens.....</i>	<i>100</i>
<i>Tableau 4.2: Résultats des essais de traction par flexion des différents spécimens.....</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 4.3: Résultats des essais de traction par fendage des différents spécimens.....</i>	<i>107</i>
<i>Tableau 4.4: Résultats des essais de scléromètre des différents spécimens.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 4.5: Résultats des essais d'ultrason des différents spécimens.....</i>	<i>118</i>

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé à travers le monde. Des grosses quantités de béton sont utilisées chaque année dans le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures. Depuis sa première mise en œuvre, av. J.C, le béton a été réalisé à partir des composants de base qui sont : le ciment, l'eau et les granulats. Le béton est donc par excellence un matériau composite puisque sa matrice est composée en partie de granulats de différentes dimensions, du sable et de la pâte cimentaire. Ce matériau est présent dans tous les domaines de la construction, notamment bâtiment d'habitation ou industriel, dans les murs de soutènement, dans les ouvrages d'art comme les ponts, les centrales nucléaires, les barrages et les tunnels.

Durant les dernières décennies, les chercheurs ont élaboré plusieurs travaux scientifiques dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. Au début des années 1980, les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont vu le jour. Ces bétons, caractérisés par une résistance à la compression qui dépasse les 60 MPa, sont actuellement très utilisés dans le monde dans le domaine des constructions importantes.

Le béton à haute performance possède une très bonne résistance à la compression, mais présente une faible résistance à la traction, donc il reste toujours un matériau fragile et vulnérable, sous l'effet d'efforts importants comme dans le cas des secousses sismiques. Sa rupture est brutale et se manifeste par des fissurations sans déformation préalable de la matrice.

Pour améliorer cette faible résistance à la traction et éviter ce phénomène de rupture et pour contenir une macro fissuration stable dans les zones tendues, le béton doit être renforcé dans la plupart des cas par des armatures.

Actuellement, l'amélioration du comportement de béton à haute performance vis-à-vis de la traction, consiste à l'incorporation des fibres métalliques dans la formulation initiale. Le rôle principal de ces fibres est de couvrir les microfissures actives qui retardent l'apparition des macro fissurations et éviter ainsi la rupture brutale. Néanmoins, l'incorporation des fibres métalliques dans le béton frais a une influence directe sur son ouvrabilité, qui se traduit par une mise en œuvre difficile.

L'utilisation des bétons renforcés de fibres a connu diverses applications. On peut citer les dallages industriels, la réparation des canalisations d'assainissement, la projection sous voûte dans les tunnels, la réalisation de chaussées entièrement faites en béton de fibres des chaussées d'autoroutes ou chaussées de parkings.....etc.

L'objectif de notre travail est de :

- trouver un béton ordinaire de référence,
- confectionner un béton à haute performance de résistance qui dépasse les 60 MPa avec une ouvrabilité optimale,
- obtenir un béton à haute performance renforcé de fibres métalliques avec une meilleure résistance à la traction et une meilleure ouvrabilité.

Le travail effectué consiste en la réalisation des plusieurs gâchés et de plusieurs série d'éprouvettes Dans notre travail, les fibres utilisées sont des fibres métalliques fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé, commercialisées par la société Sika sous le nom de Dramix (METAL FIBRES VISCOCHAPE). Elles comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux deux extrémités, qui permettent un meilleur encrage dans la matrice, et sont accolées en plaquettes au moyen d'une colle à base d'acétate de polyvinyle, qui se dissout facilement au contact de l'eau, pour assurer leur répartition dans le béton. Ces fibres sont caractérisées par une longueur de 30 mm et de diamètre de 0,55 mm. Plusieurs séries d'éprouvettes de béton renforcées par ces fibres à différents pourcentages ont été réalisées.

Le travail est organisé en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre de ce travail est consacré Dans le premier point à l'étude bibliographique sur les bétons à haute performance, leurs formulations, leurs propriétés mécaniques, leurs avantages et leurs domaines d'utilisations. Dans le deuxième point Nous présenterons les bétons de fibres, la nature des fibres, formulation de béton de fibres, leurs propriétés mécaniques et leur domaine d'utilisation.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux de la composition de béton à haute performance renforcé par des fibres métalliques.
- Le troisième chapitre est consacrée à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux, le matériel utilisé dans notre travail et les essais qui ont été effectués dans au laboratoire. La méthode utilisée est la méthode dite "*Dreux-Gorisse*" [48], utilisée pour le calcul des masses des composantes du béton ordinaire de référence. On optimise la composition obtenue en utilisant une méthode expérimentale basée sur la méthode de "*Baron-Lesage*", puis on détermine la masse des fibres à incorporer dans le béton pour les pourcentages de fibres de 0,5, de 1 et de 1,5% en volume pour la formulation de béton à haute performance renforcé de fibres métalliques. Dans cette partie, on s'intéresse à l'ouvrabilité du béton on utilisant le cône d'Abrams. Puis, des essais destructifs de compression, de traction par flexion, de traction par fendage et des essais non destructifs

tels que les essais sclérométriques et ultrasoniques effectués sur des éprouvettes à l'âge de 7, 14, 21, 28 jours. Les essais ont été effectués au niveau de laboratoire d'hydraulique de *Matériaux De Construction* (MDC) de l'université *Hassiba Ben Bouli* de Chlef. Les résultats ont été enregistrés pour chaque type d'essai et y sont interprétés.

Enfin une conclusion générale est proposée avec quelque perspective elle met en évidence la composition de béton à haute performance renforcé avec un pourcentage de fibres adéquate pour une meilleure ouvrabilité et une meilleure résistance à la traction.

CHAPITRE 1

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. BETON A HAUTE PERFORMANCE

1.1.1 Généralités

Pendant longtemps, les concepteurs et l'industrie du béton se sont contentés de prescrire et de mettre sur le marché un béton universel dont la résistance en compression varie entre 15 et 25 MPa. La rhéologie de tels bétons est principalement contrôlée par quantité d'eau introduite dans le béton lors de son gâchage ou lors de sa mise en place sur le chantier. Cependant, dans plusieurs pays industriels, on a pu augmenter légèrement la résistance à la compression des bétons utilisés dans la construction (de 25 à 55 MPa) grâce à l'utilisation de réducteur d'eau. [1]

Durant les dernières décennies, les chercheurs ont élaboré plusieurs travaux scientifiques dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton frais et durci. La vulnérabilité du béton à la pénétration des agents agressifs est en relation directe avec sa porosité, il est donc nécessaire d'explorer des voies visant à optimiser cette porosité afin d'offrir au béton une meilleure performance. D'une part, on vise à réduire l'eau aux quantités indispensables à l'hydratation du ciment par l'emploi d'un superplastifiant, et d'autre part, on remplace une certaine quantité de ciment par des matériaux cimentaires tels que la fumée de silice, les cendres volantes ou les laitiers des hauts fourneaux. L'ajout de tels matériaux permet d'accomplir deux fonctions : l'une physique et l'autre chimique. La première fonction assure le remplissage des microvides, de l'empilement des grains de ciment tout en améliorant la compacité du mélange. La deuxième fonction (fonction chimique) est la fixation de la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment, pour former un composant de silicate de calcium hydraté plus dense et plus résistant que celui des bétons Ordinaires. [2]

Durant les années 70, on a vu apparaître aux Etats-Unis des bétons ayant des résistances à la compression comprises entre 50 et 60 MPa utilisés pour construire les colonnes des gratte-ciels. Ces bétons étaient fabriqués en sélectionnant avec soin les ingrédients entrant dans la composition du béton, en le réduisant d'eau utilisée et en remplaçant une certaine quantité de ciment portland par une cendre volante performante. [3]

Les ajouts présentent une activité liante croissante et le type de ciment influe également sur la qualité du béton. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance. L'utilisation de la fumée de silice avec un superplastifiant est reconnue pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances. Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi, la

granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler, qui conduit à un empilement plus compact des grains solides. Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cet ajout. Certains d'entre-deux considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance de la liaison granulat/matrice de ciment. La technologie des adjuvants a fait beaucoup de progrès lorsque toute l'efficacité des propriétés dispersantes des polynaphthalène et sulfonates a commencé à être utilisée, non seulement pour augmenter la fluidité du béton, mais aussi pour diminuer le rapport eau/ciment grâce à l'utilisation de ces polymères synthétiques. Il devint facile d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à 100 MPa sans aucun effet négatif sur la rhéologie du béton. Les bétons à haute performance, qui sont simplement des bétons de faible rapport E/C ou E/L, sont aussi des bétons économiques du point de vue coût initial, car il est possible de construire une structure équivalente avec moins coffrage et moins d'armatures. [1]

L'appellation béton à hautes performances s'applique aux bétons dont la résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) est supérieure à 60 MPa. Néanmoins la résistance à la compression élevée n'est pas la seule et la principale propriété des bétons à hautes performances, car plusieurs autres propriétés se trouvent améliorées, telles que la très faible perméabilité donc une durabilité accrue.

Le béton à hautes performances apporte en outre des avantages multiples par rapport au béton ordinaire. Parmi les avantages du BHP :

- La maniabilité est accrue sans risque de ségrégation lors de la mise en œuvre,
- La durabilité des structures est améliorée par la forte compacité du béton avec une perméabilité à l'air et à l'eau réduite, une résistance aux agressions, et une meilleure résistance à l'alcali-réaction, une plus grande résistance à l'abrasion, une meilleure tenue aux cycles de gel/dégel,
- la conception des structures plus minces grâce à l'augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) tant au jeune âge qu'à terme,

Cependant les propriétés améliorées des bétons à hautes performances ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs dispositions simultanées comme :

- les granulats qui doivent être de bonne qualité, la résistance du béton pouvant être limitée par celle des granulats eux-mêmes,
- l'emploi d'adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiants réducteurs d'eau ainsi que des ajouts minéraux tels que la cendre volante, le laitier du haut fourneau, la fumée de silice.... etc,
- l'emploi de ciments de classe élevée à des dosages compris entre 400 et 550 kg/m³.

L'utilisation du béton à hautes performances progresse constamment dans le domaine de construction et le nombre d'édifices en béton à hautes performances ne cesse d'augmenter car les concepteurs et les maîtres d'oeuvre réalisent la valeur et la durabilité de ce béton. [2]

1.1.2. Les voies d'obtention des hautes performances

Smeaton (1756), Vicat (1818), Apsdin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), Coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé.

Puis, durant un siècle, le béton resta un mélange de granulats, de ciment et d'eau. Ce dernier constituant jouait deux rôles essentiels: assurer l'hydratation du ciment et participer activement à l'ouvrabilité du béton frais en lui donnant une rhéologie satisfaisante.

Cette dernière décennie, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la résistance et la durabilité, des excès de l'eau non hydratée pourtant nécessaire à l'obtention de la rhéologie utile lors de la mise en œuvre. Dans les perspectives d'améliorer les propriétés constructives du béton, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à réduire ce dosage en eau. Dans le même temps, différents chercheurs se sont attachés à reconstituer une roche massive à partir de l'obtention, lors de la composition du béton, d'un mélange de très haute compacité. Deux voies, de nature physico-chimique différentes, se sont dégagées pour obtenir de haute performance:

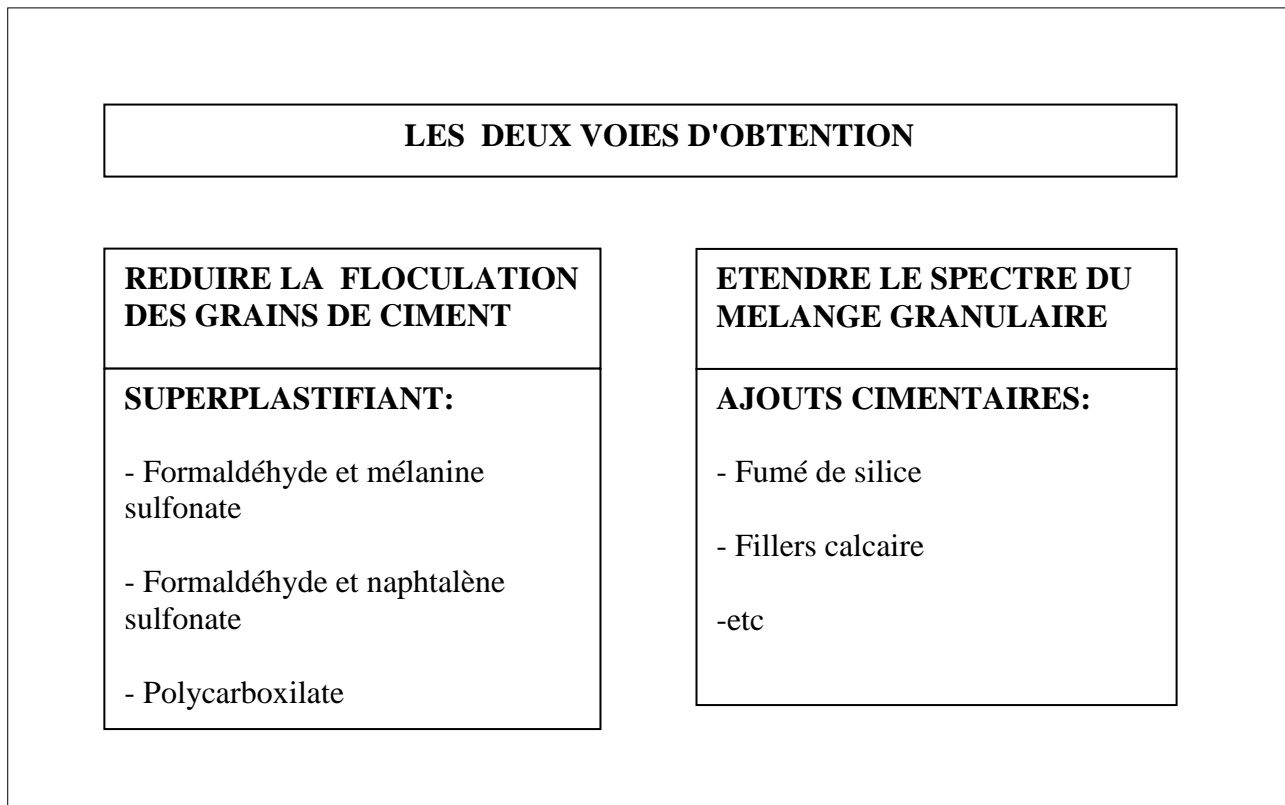
1.1.2.1. La défloculation des grains de ciment

Cette défloculation est obtenue par l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélamine sulfonate ou condensés de formaldéhyde et naphthalène sulfonate). Elle permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle (entre 5 et 50 mm pour l'essentiel). Cette première voie conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau nécessaire puisque une forte part de celle-ci n'est plus, comme dans le béton traditionnel, piégée dans les floes de grains de ciment et donc peut être utile à la maniabilité.

1.1.2.2. L'extension du spectre du mélange granulaire

Cette extension est obtenue par utilisation d'éléments ultrafins (fumé de silice, fillers calcaire, etc), chimiquement réactifs, destinés à remplir les microvides de l'empilement de grains en améliorant ainsi la compacité du mélange tout en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais. Corollairement, la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du béton peut encore être réduite [4]. Du point de vue applicabilité avec des matériaux locaux on peut obtenir des bétons ayant une résistance atteignant à la compression être 60 et 80 MPa. Avec d'autres approches plus strictes et avec un bon choix de matériaux (ciments et granulats de quantités exceptionnelles, adjonction des polymères,...), on peut atteindre des performances dépassant 90MPa. [5]

Tableau 1.1: Les voies d'obtention des hautes performances [4]



La première voie peut être utilisée seule et conduit déjà à des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et de durabilité intéressantes. La seconde voie, évidemment, implique le recours simultané à la première, tant il est bien sur inutile de compléter le spectre du mélange granulaire en direction des éléments très fins si l'on n'a pas, avant tout, réduit la floculation. [4]

1.1.3. Formulation d'un BHP

1.1.3.1. Principe de formulation d'un BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- une très faible teneur en eau,
- une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats. [6]

1.1.3.2. Méthodes de formulation d'un BHP

1.1.3.2.1. Méthode de Dreux – Gorisse

La méthode de G. Dreux et L. Gorisse (1970) rassemble les différentes méthodes de l'époque (Valette, Faury, Joisel, *etc.*) et en déduit une méthode pratique et simplifiée de formulation adaptée aux matériaux utilisés même actuellement, notamment les BHP avec quelques ajustements propres. Cette méthode est basée sur l'obtention d'une courbe granulométrique continue permettant de produire un squelette granulaire le plus dense possible, et d'optimiser le dosage en ciment et en eau des bétons ordinaires.

La courbe granulaire de référence est exprimée en échelle semi-log (échelle des analyses granulométriques), et le point de brisure est défini par :

❖ son abscisse : $D_{max}/2$ si D_{max} inférieur à **25 mm** et $(D_{max}-5\text{mm})/2$ si $D_{max} > 25 \text{ mm}$,

❖ et son ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_s$.

Avec K un terme correcteur d'arrangement granulaire prenant en compte le dosage en fines (Ciment et fillers), l'angularité des granulats et la puissance de serrage ; K_s une fonction du module de finesse du sable.

1.1.3.2.2. Méthode de Baron - Lesage

L'approche classique adoptée en France est la méthode de Baron - Lesage tirée de l'expérimentation et développée au LCPC dans les années 1980.

Cette méthode pratique est basée sur des essais au maniabilimètre LCPC (figure 1.1) et permet avec cet outil de déterminer la maniabilité maximale du béton en fonction du rapport Sables sur Gravillons (S/G). Elle a l'avantage de mener à des bétons qui présentent des risques de ségrégation minimaux.

La théorie de Baron - Lesage est fondée sur les hypothèses suivantes qui ont été vérifiées par l'expérience (Rossi, 1998) :

- pour un rapport E/C fixé, le béton le plus maniable est celui dont le squelette granulaire est le plus compact,
- le rapport S/G correspondant à cet optimum de compacité est indépendant de la quantité de pâte de ciment.

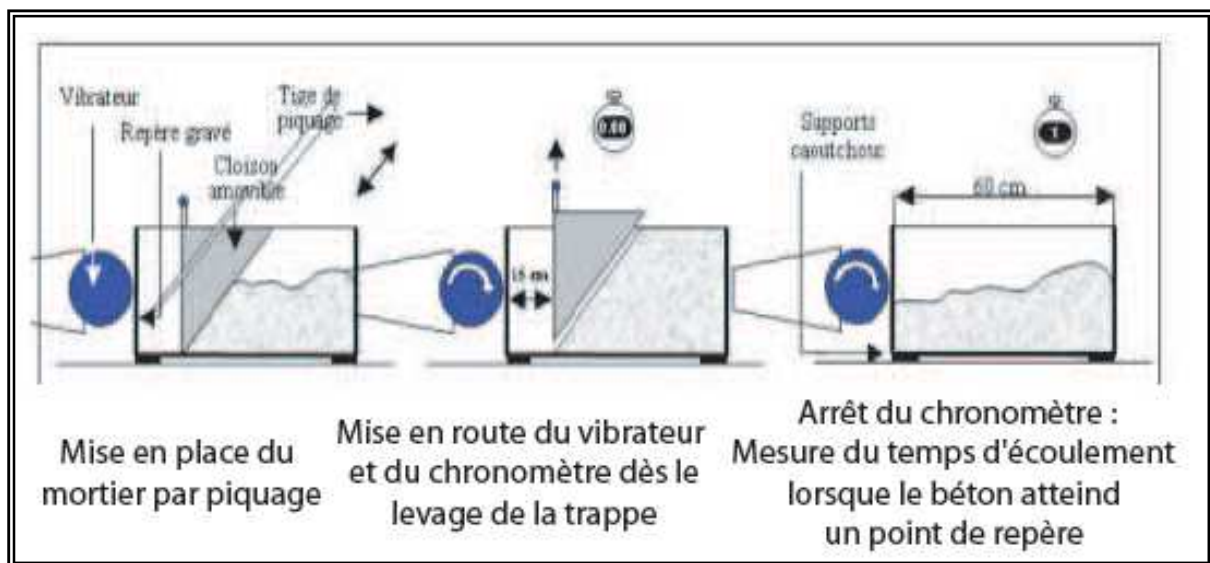


Figure 1.1: Mesure du temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC [7]

1.1.3.2.3. Méthode de De-Larrad

Les modèles théoriques présentent l'intérêt majeur de réduire le nombre de gâchées effectuées au laboratoire. Le Modèle d'Empilement Compressible MEC a été développé par Sedran et de Larrard. L'avantage de ce modèle est qu'il décrit mathématiquement un empilement granulaire en prenant en compte le squelette granulaire dans son ensemble, depuis les particules micrométriques jusqu'aux particules centimétriques, tout en s'appuyant sur les notions de compacités virtuelles. Il vise à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes granulaires, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, distribution granulaire, compacités des tranches mono-dimensionnelles) et pour une énergie de mise en place de l'empilement granulaire décrite par un indice représentatif de son degré de serrage, traduisant l'énergie fournie pendant la mise en place. Cette méthode d'optimisation a l'avantage de prendre en considération la granulométrie des particules, leur forme et l'interaction entre les grains. Ce modèle a été utilisé avec succès pour la formulation de mélange de béton ordinaire, à haute performance et auto-nivelant.

Le logiciel René-LCPC a été développé à la suite de ce travail et programme le MEC sur la base de l'optimisation granulaire. Il prédit la viscosité plastique, le seuil de cisaillement, l'affaissement au cône et différentes propriétés du béton (résistance, déformations différées, *etc.*) à partir de sa composition et du modèle granulaire. Cela permet d'évaluer l'importance d'un paramètre de formulation sur la performance du béton. [7]

1.1.4. Exemples de formulation d'un BHP

1.1.4.1. Pont de joigny

Tableau 1.2: Formulation du BHP pour Pont de joigny (sans fumée de silice) [6]

CEM I 52,5	450 kg
Granulat 6/20	1 027 kg
Sable 0/4	648 k g
Sablon	105 kg
Eau	160 l
Superplastifiant	11,25 kg
Retardateur	4,5 kg

1.1.4.2. Pont de jonche

Tableau 1.3: Formulation du BHP pour Pont de jonche (avec fumée de silice) [6]

CEM I 52,5	420 kg
Fumée de silice	35 kg
Gravillon 6/10	250 kg
Gravillon 10/14	730 kg
Sable 0/4	660 k g
Sablon0/1	140 kg
Eau	152 l
Superplastifiant	1.73 kg

1.1.5. Facteur influençant sur le comportement mécanique du BHP

1.1.5.1. Influence du rapport E/C

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle :

- l'une physique qui confère au béton ses propriétés rhéologiques,
- et l'autre chimique qui contribue au développement des réactions dites d'hydratation.

En effet, pour un mélange granulaire sec, l'ajout d'eau agit tout d'abord comme un lubrifiant entre les particules qui ont le plus de facilité à glisser les unes sur les autres et à se placer de façon optimale. [8] Mais, les ciments ne le permettent pas d'une part, parce que les particules de ciment présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées et ont alors tendance à flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau. D'autre part, la réaction d'hydratation se développe aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau. Jouant une fonction rhéologique qui permet d'assurer la maniabilité du béton frais, l'idéal serait tout de même que la quantité d'eau nécessaire à la rhéologie du béton soit strictement celle nécessaire à l'hydratation du ciment. En effet, si la quantité d'eau nécessaire pour une hydratation complète est de 25 à 30 % de la masse de ciment (23% pour la stoechiométrie), près du double de cette quantité est nécessaire pour obtenir une maniabilité suffisante sans adjuvantation (47% en pratique). [9] De multiples recherches ont montré l'effet bénéfique d'une diminution du rapport E/C sur le développement des résistances mécaniques du béton.

La résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Féret avait postulé cette conclusion de manière empirique (figure 1.2). L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en oeuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme précisé dans l'illustration. [10]

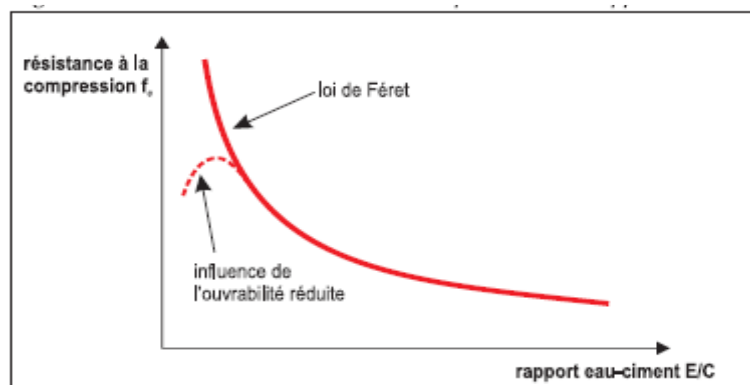


Figure 1.2: Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C [10]

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau-ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10^{-9} à 10^{-8} m – les pores de gel – et sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible.

Ils observent cependant aussi des pores de plus grandes dimensions – les pores dit capillaires – dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} m. Leur quote-part dépend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue.

La (figure 1.3) montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible. [10]

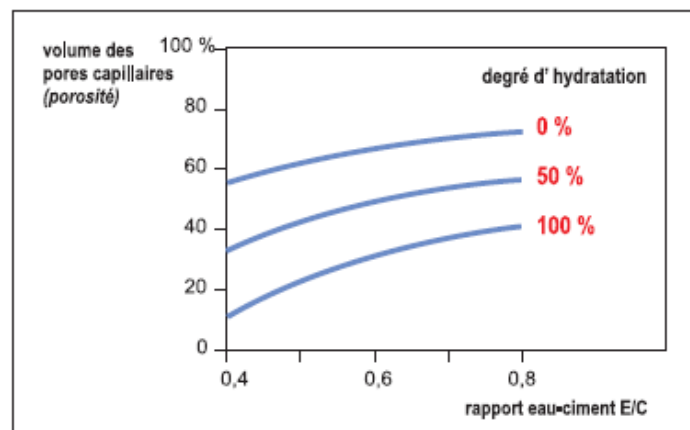


Figure 1.3: Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation [10]

1.1.5.2. Propriété des gros granulats

Comme les trois quarts du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais selon leurs propriétés, ils affectent la durabilité et les performances structurelles du béton.

La sélection des granulats doit être faite avec beaucoup de soin au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée ; puisque les granulats peuvent devenir le chaînon le plus faible où va s'initier la rupture du béton lorsqu'il sera soumis à des contraintes élevées.

La contrainte à partir de laquelle se développent les fissures dépend en grande partie des propriétés des gros granulats telles que : leur forme, leur nature, leur propreté, leur porosité, leur état de surface, leur courbes granulométriques et leur dureté.

Dans le cas des BHP, les propriétés du granulat, en particulier sa forme et sa texture, influencent beaucoup moins la résistance de rupture à la compression que la résistance à la traction. [11]

1.1.5.3. Influence du type de granulats

L'influence de la minéralogie et des propriétés mécaniques (résistance à la traction, résistance à la compression, énergie de rupture et module d'élasticité) d'un certain nombre de gros granulats sur la résistance mécanique et les propriétés élastiques des bétons. Quatre gros granulats différents ont été utilisés : du Quartz concassé (QC) ; du Granite concassé (GC) ; du Calcaire (CL) ; et du Marbre (MB). La dimension de ces granulats variait de 5 à 20 mm.

Les trois bétons ont été confectionnés avec différents rapports E/C (0,55, 0,44 et 0,26) et la résistance à la compression obtenue était comprise entre 40, 60 et 100 MPa [12].

Les propriétés mécaniques des gros granulats utilisés sont présentées dans la (figure 1.4):

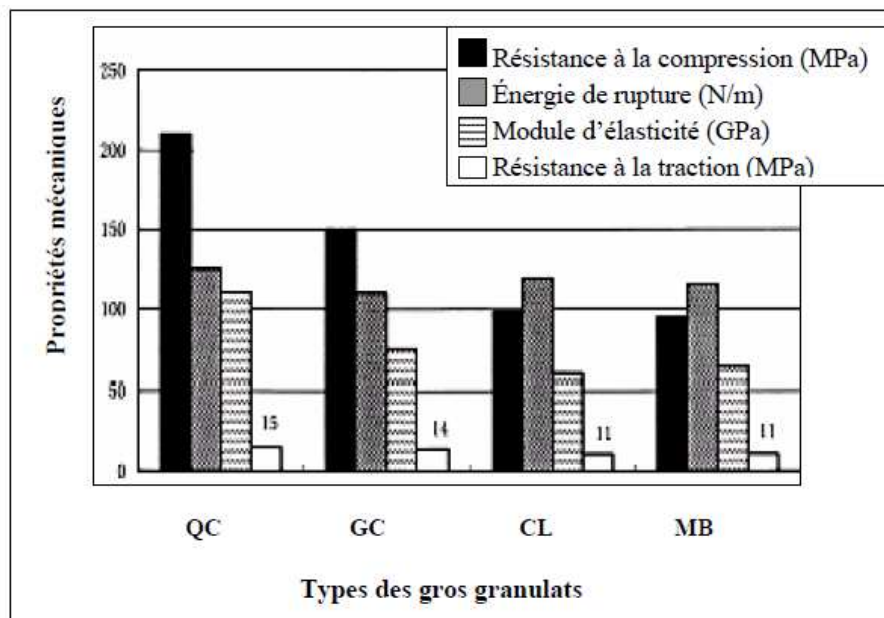


Figure 1.4: Propriété mécanique des granulats [12]

Le même type d'éprouvettes (cubes $100 \times 100 \times 100$) mm ont été utilisés pour la mesure de la résistance en compression (f_c) et la résistance en traction par fendage (f_{fe}) des bétons confectionnés à l'âge de 28 jours.

Les valeurs obtenues des résistances sont chiffrées dans le tableau suivant :

Tableau 1.4 : Influence du type de granulat sur les résistances mécaniques des bétons [12]

E/C	Type de granulats	f_c (MPa)	f_{fe} (MPa)
0.26	QC	98.2	8.4
	GC	99.1	7.9
	CL	83.4	7.3
	MB	79.8	7.6
0.44	QC	70.4	5.2
	GC	65.8	5.3
	CL	60.5	5.0
	MB	62.1	5.1
0.55	QC	44.8	4.1
	GC	43.2	4.2
	CL	46.6	3.9
	MB	45.0	4.2

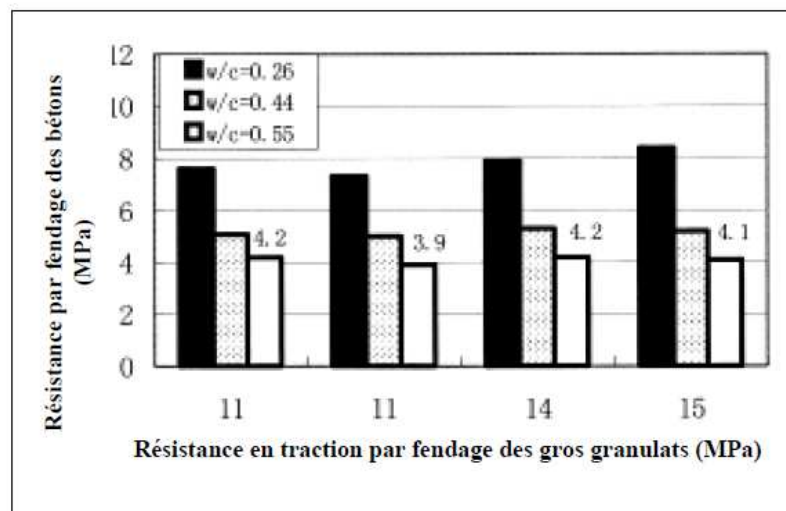


Figure 1.5 : Relation entre la résistance en traction par fendage des bétons et des granulats [12]

Concernant la nature minéralogique des granulats, les auteurs apportent que les bétons qui contenaient du granite et du quartz avaient des résistances en compression et en traction plus importantes que les bétons qui contenaient du calcaire et du marbre (tableau 1.4).

Du point de vue de la résistance à la traction du granulat, plus elle est importante, plus la résistance à la traction des bétons est améliorée (figure 1.5). Cependant il a été constaté que la résistance en traction des gros granulats et leur nature ont un impact plus prononcé sur la résistance en traction dans le béton à faible rapport E/C que celui des bétons à fort rapport E/C.

L'influence du type de granulat sur la résistance à la traction du béton est fonction du rapport E/C, cette influence des granulats diminue avec l'augmentation du rapport E/C, probablement parce que le comportement de la pâte de ciment hydraté prédomine sur celui des granulats dans les bétons de rapport E/C élevé. Pour des rapports E/C inférieure à 0.44, les résistances obtenues ont été majorées de 62% pour le même type de granulat. [12]

L'utilisation des granulats de basalte dans le béton à hautes performances améliore la résistance à la traction par fendage de 10% par rapport à leurs homologues calcaires. Lorsqu'on désire fabriquer un béton à hautes performances, il faut porter une attention particulière à la nature du gros granulat lors de sa sélection. Ainsi ces études favorisent l'utilisation de granulats durs et résistants pour l'obtention des BHP. [13]

1.1.5.4. Influence du volume en gros granulats

Le volume en gros granulats est un facteur de deuxième importance quant à la résistance à la traction.

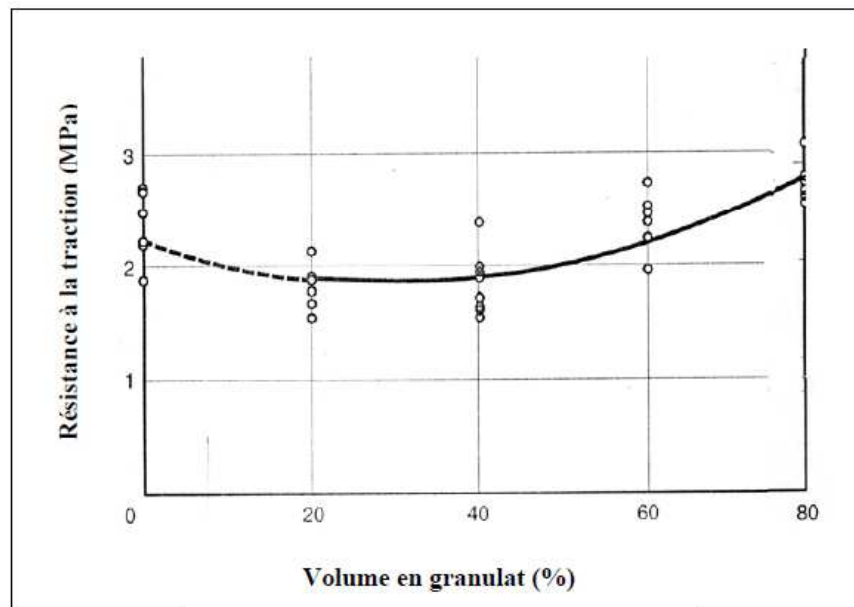


Figure 1.6 : Relation entre la résistance à la traction directe et le volume de granulat [11]

(La figure 1.6) présente l'allure générale de l'influence du volume des gros granulats sur la résistance à la traction directe du béton.

Pour une quantité de pâte de ciment donnée, la (figure 1.6) indique, que lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20%, il y a une diminution graduelle de la résistance à la traction alors que, entre 40 et 80%, on constate une augmentation de celle-ci. L'explication la plus probable de ce comportement provient du fait qu'une plus forte teneur en granulat contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans

les liaisons granulats et pâte de ciment. De même le pourcentage de vides par rapport au volume total est plus faible et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance. [11]

1.1.5.5. Influence du dosage en ciment, dosage en adjuvant, rapport G/S

L'influence des paramètres de composition sur les caractéristiques mécaniques du béton à haute performance à l'état frais et à l'état durci. Pour cela ils ont confectionné quatorze bétons ils faisant varier les différents paramètres [le rapport eau sur liant (E/C), le dosage en ciment, la quantité d'adjuvant et le rapport G/S] [14].

Tableau 1.5: Compositions et propriétés des bétons [14]

Désignation des bétons	Ciments (kg/m ³)	Eau/Liant E/C	Adjuvant (L/m ³)	Graviers/Sables G/S	Affaissement (cm)	Résistance en compression R _c (MPa)		
						7j	28j	60j
						Cyl/Cub	Cyl/Cub	Cyl/Cub
BT ₄₇₅	475	0,39	10	2,04	19,2	45/53	55/69	58/69
BT ₄₇₅	475	0,39	10	2,04	19,2	-/53	-/69	-/69
BT ₄₇₅	475	0,35	10	2,04	17,33	-/54	-/68	-/70
BT ₄₇₅	475	0,30	10	2,04	15	-/52	-/64	-/71
BT ₄₇₅	475	0,35	10	2,04	17,5	-/53	-/68	-
B ₄₅₀	450	0,35	10	2,04	15,5	-/54,5	-/69	-
B ₄₀₀	400	0,35	10	2,04	8	-/54	-/67	-
B ₄₅₀	450	0,35	10	2,04	15,5	-/54,5	-/69	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	2,04	14,6	-/53	-/68	-
B ₄₅₀	450	0,35	6	2,04	9,2	-/52	-/61	-
B ₄₅₀	450	0,35	10	2,12	18,2	-/57	-/69	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	2,12	15,2	-/55	-/68	-
B ₄₅₀	450	0,35	6	2,12	14	-/54	-/67	-
B ₄₅₀	450	0,35	10	1,99	14,5	-/59	-/67	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	1,99	13,5	-/55	-/69	-
B ₄₅₀	450	0,35	6	1,99	11,5	-/53,5	-/64	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	2,12	15,2	-/55	-/68	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	2,04	14,6	-/53	-/68	-
B ₄₅₀	450	0,35	8	1,99	13,5	-/55	-/69	-

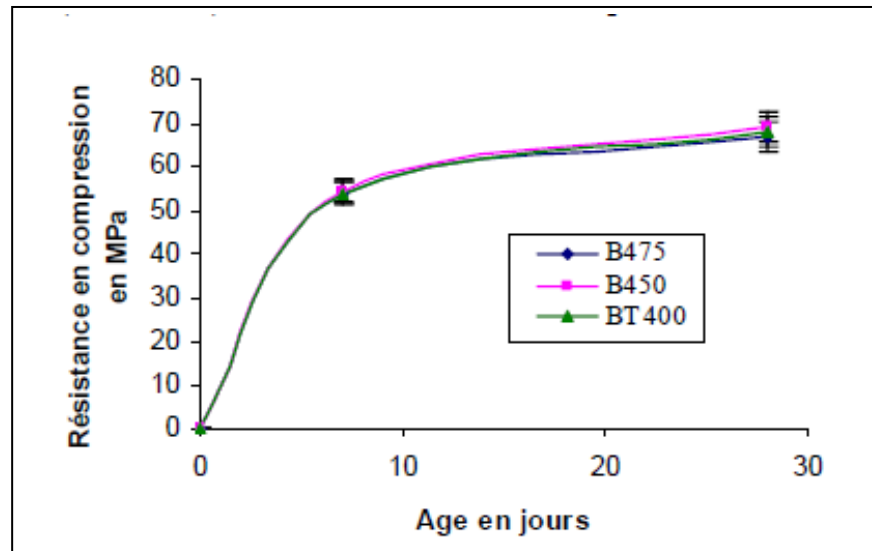


Figure 1.7: Evolution de la résistance en compression du béton en fonction du dosage de ciment [14]

Les résultats des trois séries suivantes indiquent que la diminution du dosage en ciment a entraîné une diminution de l'affaissement (tableau 1.5) et une résistance à la compression satisfaisante (figure 1.7).

Les résultats des trois séries suivantes dans lesquelles les bétons ont été fabriqués avec un dosage en ciment 450 kg/m^3 , un rapport E/C égal à 0,35, et les quantités d'adjuvant sont respectivement de 10 L/m^3 , 8 L/m^3 et 6 L/m^3 sont des bétons qui répondent aux exigences demandées (affaissement au cône d'Abrams compris entre 10cm et 16cm et une résistance à la compression sur éprouvettes cubiques supérieure ou égale à 67MPa) ; Pour la première série le rapport G/S est égal à 2,04 et les quantités d'adjuvant sont égales à 10 L/m^3 et 8 L/m^3 .

Les résultats des deux séries suivantes (tableau 1.5) pour lesquelles le rapport G/S a été encadré par les valeurs 2,12 et 1,99 suite à des corrections des courbes granulométriques. Ces résultats montrent que pour un rapport G/S égal à 2,12 pour les quantités d'adjuvant de 8 L/m^3 et 6 L/m^3 , le couple de valeurs (affaissement/résistance à la compression) est satisfaisant. Pour le rapport G/S égal à 1,9 le couple de valeurs satisfaisantes est obtenu avec les quantités d'adjuvant égales à 10 L/m^3 et 8 L/m^3 .

La dernière série nous indique que la variation du couple de valeurs (affaissement/résistance à la compression) pour un béton dosé à 450 kg/m^3 , un rapport E/C égal à 0,35, un dosage en adjuvant de 8 L/m^3 , reste minime lorsque le rapport G/S varie dans l'intervalle [1,99-2,12] (tableau 1.5).

La diminution du dosage en ciment du béton BT₄₇₅ BHP C55/67 à 450 kg/m^3 puis à 400 kg/m^3 donne des valeurs satisfaisantes pour la résistance à la compression à 28j mais pour le béton BT₄₀₀ l'ouvrabilité n'est pas satisfaisante.

Dans le béton BT₄₅₀ lorsque la variation de la quantité d'adjuvant diminue pour un rapport G/S égal à 2,12 pour les quantités d'adjuvant de 8 L/m^3 et 6 L/m^3 , le couple de valeurs

(affaissement/résistance à la compression) est satisfaisant. Pour le rapport G/S égal à 1,9 le couple de valeurs satisfaisantes est obtenu avec les quantités d'adjuvant égales à 10L/m^3 et 8L/m^3 . Enfin les résultats nous indiquent que pour un béton dosé à 450 kg/m^3 , un rapport E/C égal à 0,35, un dosage en adjuvant de 8L/m^3 lorsque le rapport G/S varie dans l'intervalle [1,99-2,12] la variation du couple de valeurs (affaissement/résistance à la compression) reste minime. [14]

1.1.6. Les avantages des BHP

L'analyse des ouvrages en BHP, selon une approche en coût global, basée sur la valorisation de ses atouts permet de valider son intérêt économique.

- Résistances en traction supérieures, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton,
- Performances en flexion qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations,
- Fluage inférieur à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide. Il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages et une meilleure efficacité de la précontrainte. Les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte;
- Réduction de l'ouverture de fissures. L'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures,
- Meilleure adhérence acier béton, d'où une réduction sensible des longueurs de recouvrement, de scellement et d'ancrage des armatures et une simplification des dispositions constructives et des schémas de ferrailage,
- Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles ce qui permet de réduire les sections d'armatures,
- Majoration des contraintes de cisaillement admissibles. Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales,
- Réduction des épaisseurs d'enrobage compte tenu des faibles porosités et sensibilités aux agents agressifs des BHP,

- Meilleure durabilité du béton, grâce à une compacité élevée due au faible rapport eau/ciment et à la présence du fumé de silice,
- Perméabilité 10 fois plus faible, ce qui assure une excellente protection des aciers (très faible pénétration des chlorures),
- Amélioration sensible des résistances au jeune âge, évitant ainsi un traitement thermique qui entraîne toujours une baisse de résistance à long terme et parfois une micro-fissuration,
- Mise en œuvre facile et absence de ségrégation grâce à l'excellente cohésion. [6]

1.1.7. Domaine d'utilisation de BHP

Le béton haute résistance (BHP), qui à une grande durabilité, assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale (BRN) utilisé traditionnellement. Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grande hauteur, en particulier pour les poteaux. Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de diamètre réduit, ce qui diminue l'encombrement. [6]

1.1.7.1. Exemple d'application de BHP

1.1.7.1.1. Pont « Stichtse » au Pays-Bas: Le premier grand pont construit aux Pays-Bas en béton à haute résistance en 1996, d'une longueur totale de 320 m.



Figure 1.8: Le pont « Stichtse » au Pays-Bas

1.1.7.2. Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001): Le complexe se compose d'un parking souterrain de quatre niveaux et de deux immeubles-tours. Ces deux tours s'élèvent sur 30 étages.



Figure 1.9: Tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001)

1.1.7.1.3. Plates-formes pétrolières en Norvège: Plus de 20 plates-formes pétrolières ont été construites avec 2 millions de m³ de BHP à partir des années 1970. Toutes ces structures sont installées en eau profonde par 70 m à 216 m de fond.



Figure 1.10: Les tours 'NORTH GALAXY' à BRUXELLES (2001)

1.1.7.1.4. La grande arche

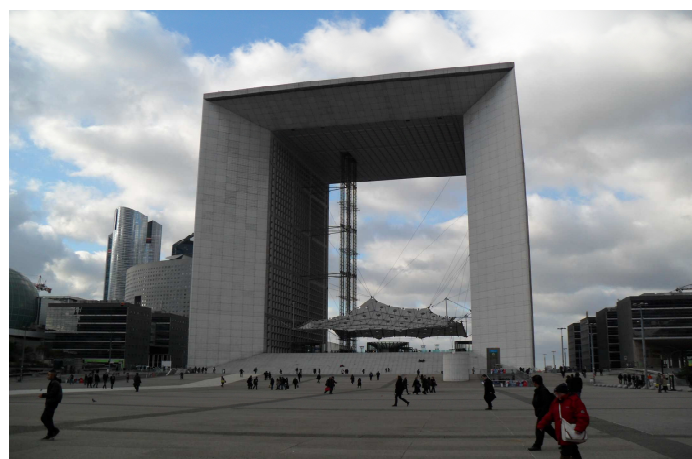


Figure 1.11: La grande arche de la défense (Paris)

1.2. BETON DE FIBRES

1.2.1 Définition de béton de fibres

Le béton de fibres métalliques (BFRM) est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées (figure 1.12), 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 à 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 1.13) Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. [15] 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. [16]

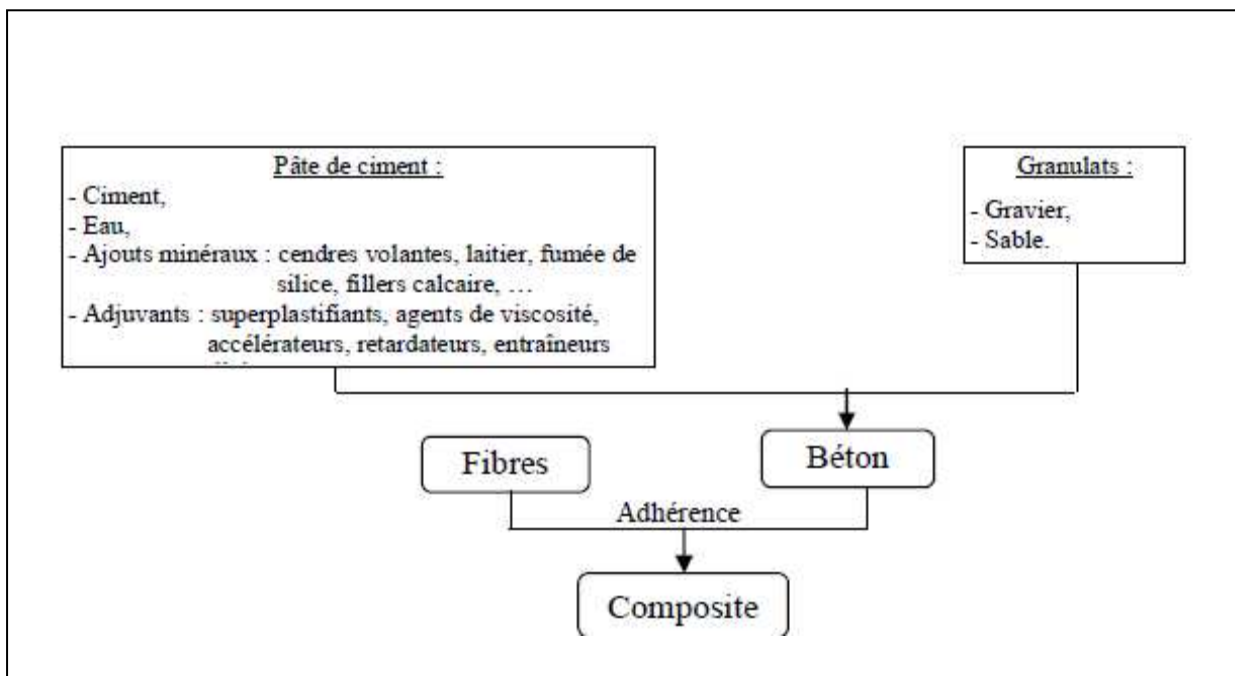


Figure 1.12 : Modèle de composite à base de fibres

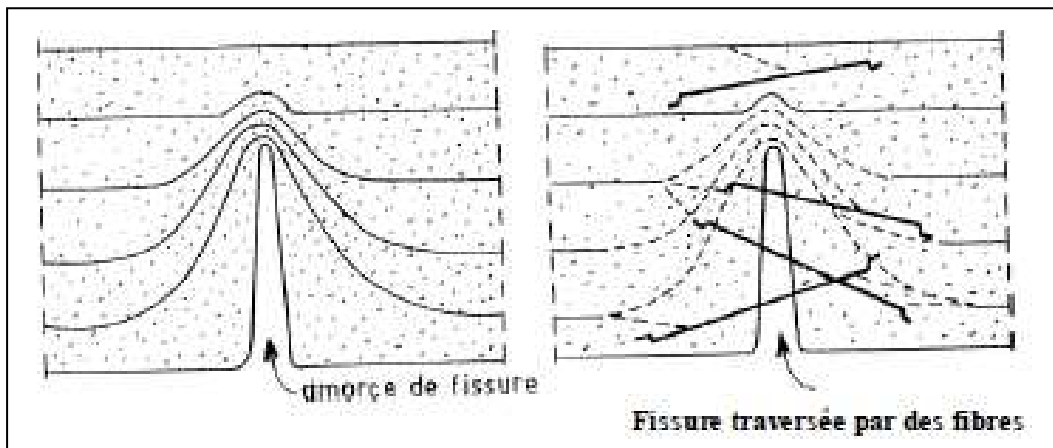


Figure 1.13: Rôle des fibres dans la matrice de béton

1.2.2. Historique de l'utilisation des fibres

Les fibres ont été utilisées pour renforcer les matériaux composés fragiles depuis l'antiquité. C'est ainsi que la paille était utilisée autrefois pour renforcer le béton de terre pendant que les poils des chevaux étaient utilisés pour renforcer les mortiers de maçonnerie et les plâtres. Plus récemment, les fibres d'amiante mélangées aux pâtes de ciment ont connu des utilisations plus larges dans le domaine de la construction (plaques de ciment amiantée), particulièrement après la 2ème guerre mondiale où les besoins en construction étaient énormes.

Actuellement, avec les problèmes de santé publique liés à l'amiante, ce type de fibres naturelles a tendance à disparaître comme ajout de renforcement du béton. C'est ainsi que d'autres types de fibres d'acier, de verre et synthétiques ont été développées pour l'industrie de la construction ; leur commercialisation se répand de plus en plus.

Le développement des fibres d'acier repose sur des expérimentations anciennes, consistant en l'utilisation d'éléments de renforcement discontinus tels que les clous, les morceaux de fil de fer et les copeaux de métal pour améliorer les propriétés du béton. C'est de là que les expérimentations des fibres d'acier comme éléments de renforcement du béton ont pris naissance ; les premières applications d'un béton renforcé en fibres ont eu lieu au début des années 60 aux Etats-Unis [17] A nos jours, les travaux de recherche et d'application se multiplient à travers le monde. Les travaux publiés et les rencontres scientifiques tenues à échelle internationale sur le thème sont les preuves d'un intérêt certain accordé à ce domaine par la recherche et par l'industrie de la construction. Des documents techniques 'Etat de l'art' du béton renforcé en fibres ont été publiés par des organismes internationaux tels que le RILEM et l'ACI. Article. [18]

1.2.3. Différentes nature des fibres

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

1.2.3.1. Fibres minérales

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

1.2.3.2. Fibres végétales

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

1.2.3.3. Fibres synthétiques

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester ...etc) Elles sont apparues à la fin du XIX^{ème} siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent des produits dérivés du pétrole et de polymères géants dont la structure ressemble à celle des matières plastiques. La première fibre plastique commercialisée avec succès, le Nylon, daté de 1938. Depuis, de nombreux synthétiques, dont les fibres acrylique, l'aramide, l'oléfine et le polystyrène sont apparus. Ces fibres ont également été étudiées à des fins industrielles très précises, telles que la fabrication des matériaux d'isolation, t'issus pare-balle, les fuselages et ailes d'avion

1.2.3.4. Fibres artificielles

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

a) Fibres de polypropylène

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

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

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 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à l demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types: les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate.

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.

c) Fibres métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, à été reste encore l'objet de recherche très importante dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil. En effet les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaciale entre fibre et la matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Ce qui les conduit aux nombreuses variété de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré, rectangulaire). Leur longueur et leur mode d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celle commercialisées par la société Bekaert sous la marque "DRAMIX".

Il existe d'autres types de fibres artificielles qui sont utilisé pour le renforcement des mortiers ou béton tellque, fibres d'amiante, fibres de cellulose.....)

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : Dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres. [19]

Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées sont présenté dans le tableau suivant:

Tableau 1.6: Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [20]

Fibres	Diamètre (μm)	Long mm	Densité	R_t MPa	E 10^3 MPa	Allongement A la rupture En %	Coeff. De Dilatation (μ / m)	R_{feu} Temps Max $^{\circ}C$
Acier	5 - 500	20 - 80	7.8	1000 - 3000	200	3 - 4	11	1500
Fonte (ruban)	36x2600 de section	50 - 60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5 - 20	40 - 70	2.6	1500 - 3000	80	2 - 3.5	9	800
Polypropy lène	10 - 200	25 - 75	0.9	400 - 750	5-10	15 - 25	90	150
Polyester	-	-	1.4	700 - 850	8	11 - 13		
Amiante	0.02 - 20	5	2.5-3.4	3000	8-15	2 - 3	1	1500
Carbone	5 - 9	Varia ble	1.7-2	2000 - 3000	250- 400	0.5 - 1.5	-	400 -1500
Sisale	10 - 50	1.50	1.5		130	3	-	-

1.2.4. Critère de choix du type des fibres

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

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

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

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés.

La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton :

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

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. [21]

1.2.5. Mécanisme de fonctionnement des fibres dans le béton

Le béton est un matériau composite à matrice fragile. L'introduction de fibres a pour objectif le contrôle de la fissuration. Les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement à partir des années 60 grâce aux travaux de Romualdi, Batson et Mande. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier de fondateurs, on décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile. Ils mettent notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres (relié au volume introduit dans le béton) sur le comportement du composite. [21]

Le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles : *le matériau et la structure*. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (Figure 1.14). Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (auréoles de transition). La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives. La deuxième phase. [22] correspond au développement des macrofissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une macrofissure (phase 3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette.

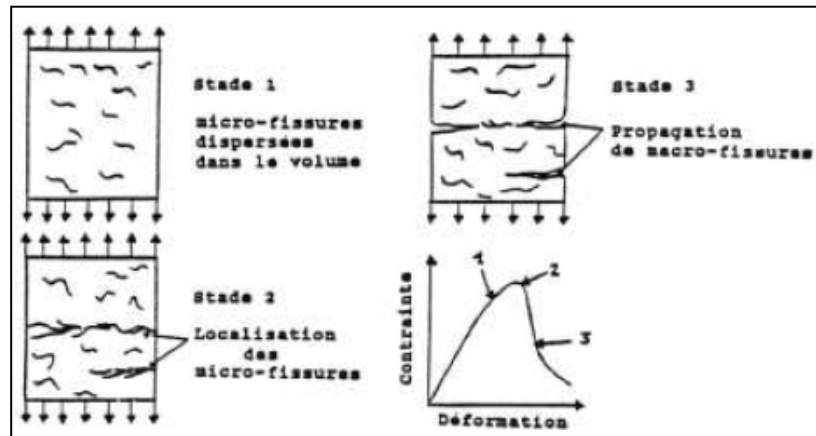


Figure 1.14: Processus de fissuration du béton [21]

(La figure 1.15) illustre le principe de couture des fibres à travers une fissure dans la matrice

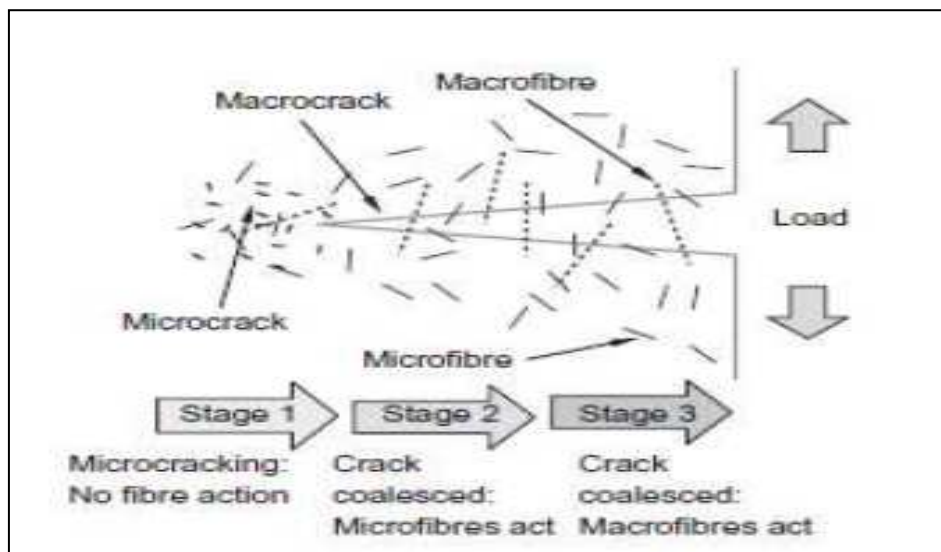


Figure 1.15: Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite [21]

Le mécanisme de couture des fibres assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et confère ainsi une ductilité au béton. [21]

Seules des fibres fines (pour agir sur les microfissures et assurer leur ancrage) en grande quantité (pour couvrir l'ensemble du volume) peuvent donc apporter une amélioration des caractéristiques intrinsèques du *matériau* en retardant le passage à la phase 2. En revanche, en phase 3, le pontage des macrofissures ne peut intervenir que par des fibres longues jouant un rôle similaire aux armatures dans le béton armé, même si le mécanisme d'ancrage est différent. Ce fonctionnement est résumé sur la (figure 1.16). [22]

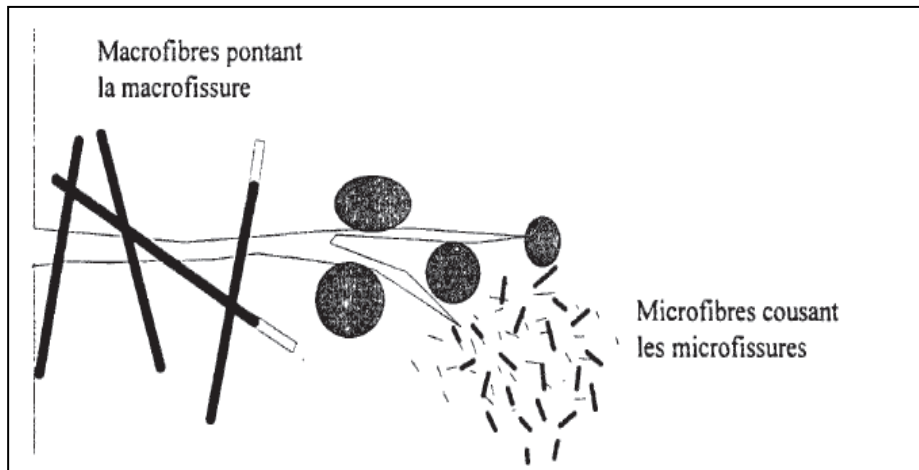


Figure 1.16: Rôle des fibres dans le contrôle de la fissuration du béton [22]

1.2.6. Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité [23]. Ils constatent 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 -a.),
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure -b).

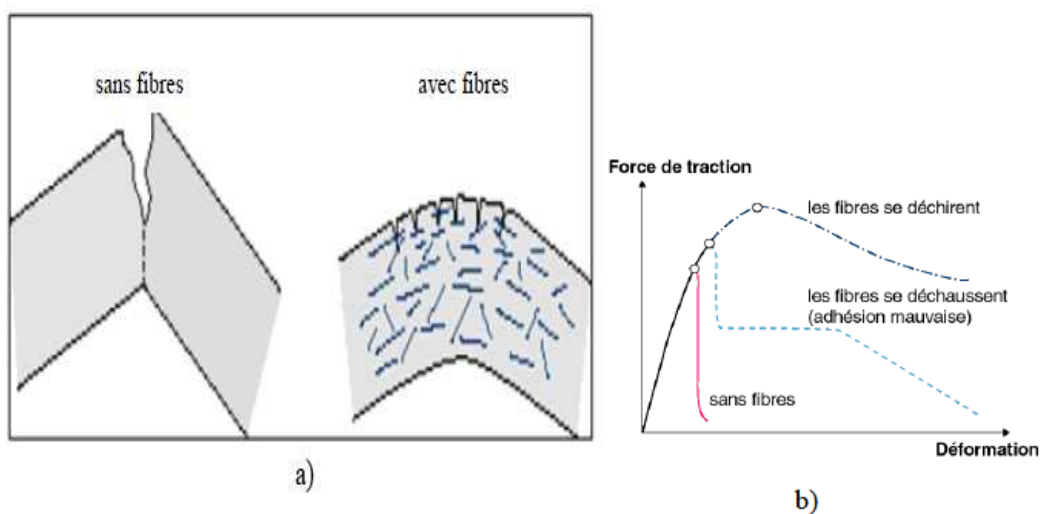


Figure 1.17: Illustration de l'apport du renfort par des fibres [19]

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. [19]

Le principe de couturation des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (figure 1.18). Les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration). Ces fibres se déforiment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [17]

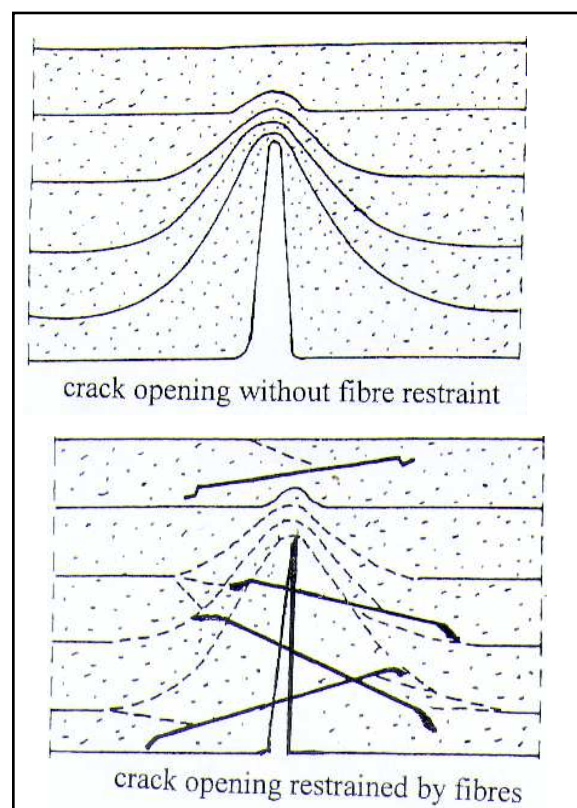


Figure 1.18: Principe de couturation d'une fissure [17]

1.2.7. Fabrication et utilité des bétons de fibres

Le béton renforcé en fibres peut être manufacturé en ajoutant les fibres directement dans le malaxeur simultanément au gravillon, sable et ciment. Malaxer le mélange pendant quelques secondes avant d'introduire l'eau de gâchage et continuer le malaxage pour une durée n'excédant pas 75 secondes. Il ne faut jamais introduire les fibres en premier dans le malaxeur. Pour obtenir une distribution uniforme des fibres dans le béton, une maniabilité élevée du béton frais est nécessaire. Cette maniabilité requise peut être obtenue en limitant le pourcentage (%) V_f en fibres et en limitant leur élanement l/d . Donc pendant que pour des considérations de performances mécaniques il est souhaitable d'utiliser des dosages élevés en fibres ayant des élanements l/d élevés, les considérations de maniabilité limitent les valeurs maximales de ces deux paramètres. Cependant, pour améliorer les caractéristiques de mise en place du béton fibré, les adjuvants superplastifiants peuvent être utilisés. [17]

1.2.8. Précautions à respecter lorsque l'on utilise du béton de fibres

Dans le cas d'un transport par bétonnière portée, il convient d'introduire les fibres sur le chantier même c'est-à-dire après le transport, et de malaxer le tout pendant 2 min;

- Dans le cas d'une fabrication en centrale avec des malaxeurs à axe horizontal, l'introduction des fibres en même temps que les granulats ne pose pas de problèmes,
- Dans le cas de malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire, les fibres doivent être introduites après la fabrication du béton et malaxé ensuite le temps nécessaire (pas plus) pour leur séparation et leur répartition spatiale (c'est la méthode LCPC),

En ce qui concerne la mise en œuvre de ce béton de fibre une fois fabriqué, elle nécessite également quelque précaution:

- Coffrages étanches pour éviter la formation de "barbes" de fibre,
- Vibration extérieure au lieu d'une vibration à l'aiguille vibrante qui provoque des "cheminées" sans fibre,
- Faire attention à la finition qui peut être la cause de tâche de rouille superficielles,
- On pourra ensuite faire la remarque suivante, qui a une importance non négligeable sur le fonctionnement des fibres: quel que soit le moyen de vibration utilisé, les fibres sont orientées dans un plan parallèle aux parois. Ce qui provoque une anisotropie qu'on peut qualifier de "construction". [24]

1.2.9. Orientation préférentielle des fibres

Cette orientation à plusieurs origines qui sont principalement:

- la technique de mise en œuvre adoptée,
- Les effets liés à l'écoulement du BFM.

1.2.9.1. La technique de mise en œuvre

Il existe différentes techniques de mise en œuvre des bétons:

- La technique de béton coulé,
- La technique de béton projeté,
- La technique de béton placé à l'aide d'une pelle, d'une pelle à main ou d'une fourche dans des coffrages ou moules de petites dimensions comme c'est souvent le cas dans un laboratoire.

1. Béton coulé

En ce qui concerne le béton coulé, deux situations sont à considérer : soit le BFM doit s'écouler pour remplir le coffrage, soit il n'a pas, ou très peu, à le faire. Dans le premier cas, l'écoulement produit une orientation préférentielle des fibres et dans le second cas, l'orientation des fibres dépend de la technique de coulage adoptée, c'est-à-dire soit à l'aide d'une pompe, soit à l'aide d'une benne (ou godet) comportant ou pas un manchon.

a) BFM coulé à l'aide d'une pompe ou d'une benne munie d'un manchon

Les fibres se trouvent orientées dans le tuyau de la pompe et dans le manchon, parallèlement aux parois et donc perpendiculairement à la surface du coffrage par laquelle pénètre le BFM. Cette orientation préférentielle est donc celle qu'auront les fibres à la fin de la mise en œuvre du BFM, aucune vibration n'étant alors susceptible de modifier l'orientation des fibres.

b) BFM coulé à l'aide d'une benne sans manchon

Les fibres subissent peu d'orientation préférentielle et l'on observe donc une orientation relativement isotrope des fibres au sein de la structure à la fin de la mise en œuvre du BFM, à l'exception toutefois du voisinage des parois du moule où une orientation préférentielle des fibres est constatée. Il s'agit de l'effet de paroi qui sera évoqué plus loin.

2. Le béton projeté

Quelque soit la technique de projection, les fibres sont toujours préférentiellement orientées parallèlement aux parois de la lance de projection à la sortie de celle-ci. En revanche, au contact de la paroi que le BFM doit renforcer, les fibres s'orientent, préférentiellement, parallèlement à la surface de cette paroi. L'importance de cette orientation préférentielle dépend du rapport longueur

de la fibre/épaisseur de BFM projeté. Ainsi plus le rapport est faible, plus l'orientation préférentielle est importante.

3. BFM mis en place à l'aide d'une pelle

On s'intéresse ici aux BFM mis en oeuvre en laboratoire pour confectionner des éprouvettes de petites dimensions. Du fait de la manière dont le BFM est prélevé par l'outil servant à remplir le moule, de la forme de celui-ci, de la manière dont l'outil introduit le BFM dans le moule, de la petitesse de ce dernier qui exclut un écoulement important du BFM, les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface du moule. Elle constitue un élément essentiel de la représentativité du comportement mécanique d'un BFM de laboratoire par rapport à celui du même BFM utilisé pour une application industrielle donnée.

1.2.9.2. Effets liés à l'écoulement du BFM

Dans le cas où le BFM peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Lorsqu'un BFM s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi et donc les fibres s'orientent également parallèlement à cette surface.

Les effets de paroi, lorsqu'un BFM s'écoule le long d'une paroi, les lignes de courant sont parallèles à la surface de la paroi, donc les fibres, s'orientent également parallèlement à cette surface. [25]

1.2.10. Différents facteurs intervenant dans le comportement mécanique du BFM

1.2.10.1. Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques

Dans la littérature, la ductilité dépend essentiellement du volume, de l'orientation et du type des fibres. Il a été montré par plusieurs chercheurs que les fibres déformées à leurs extrémités sont plus efficaces par rapport à celles déformées sur leur longueur entière. Cependant les fibres munies de crochets sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique. [26] Les fibres crochetées sont très efficaces, en offrant une meilleure ductilité; un dosage de 30 à 60 kg/m³ est suffisant pour avoir une bonne ductilité. Le crochet développe progressivement un ancrage, puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci et par frottement à l'interface avec la matrice. [27] Il y a donc déformation du crochet et glissement de la fibre dans la matrice (figure 1.19)

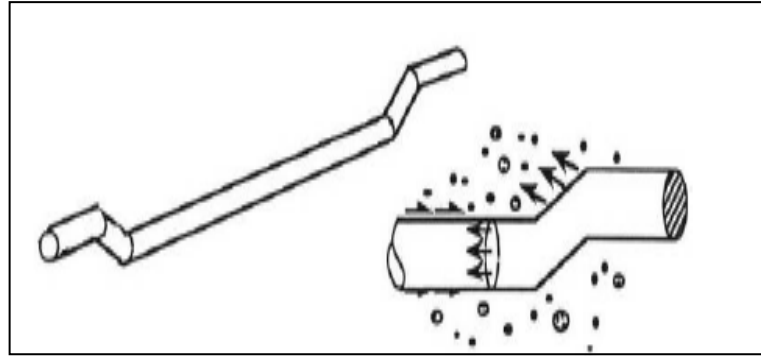


Figure 1-19: Fonctionnement de la fibre à crochets [27]

1.2.10.2. Influence du pourcentage des fibres

D'après P.Rossi, l'augmentation du pourcentage des fibres dans un **BFM** s'augmente leur efficacité vis-à-vis du comportement à l'échelle du matériau ou à celle de la structure. Que ce soit des fibres courtes ou des fibres longues.

La (figure 1.20) présente l'évolution d'une caractéristique mécanique quelconque d'un **BFM** en fonction du pourcentage de fibres. Il est évident que le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer. Par exemple une fibre courte pour augmenter les résistances (traction, compression...) ou une fibre longue pour améliorer le comportement postfissuration du **BFM**. Que ce soit le seuil d'efficacité (P_e), ou le seuil de saturation (P_s), dépendent du type de fibre, de ses dimensions, du fait que la fibre fonctionne par ancrage réparti le long de la fibre ou concentré à ses extrémités, ou par adhérence, de l'orientation des fibres.

Le pourcentage de fibre optimale du point de vue technico-économique se trouve dans l'intervalle [P_e , P_s] cet intervalle appelle, **domaine d'efficacité** d'un BFM. [25]

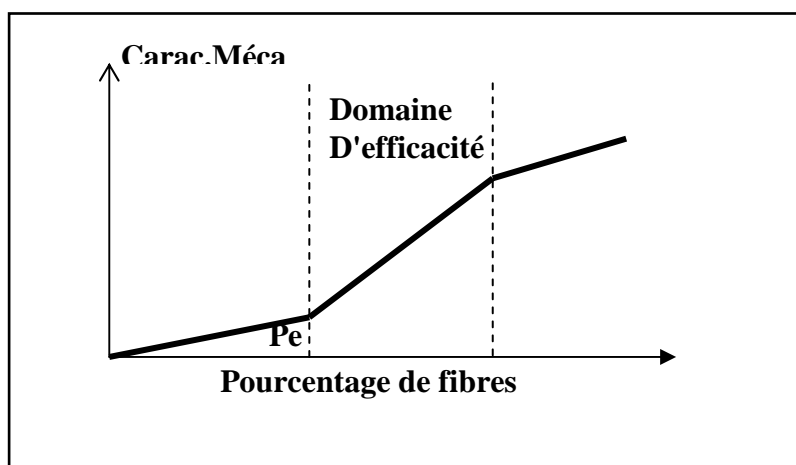
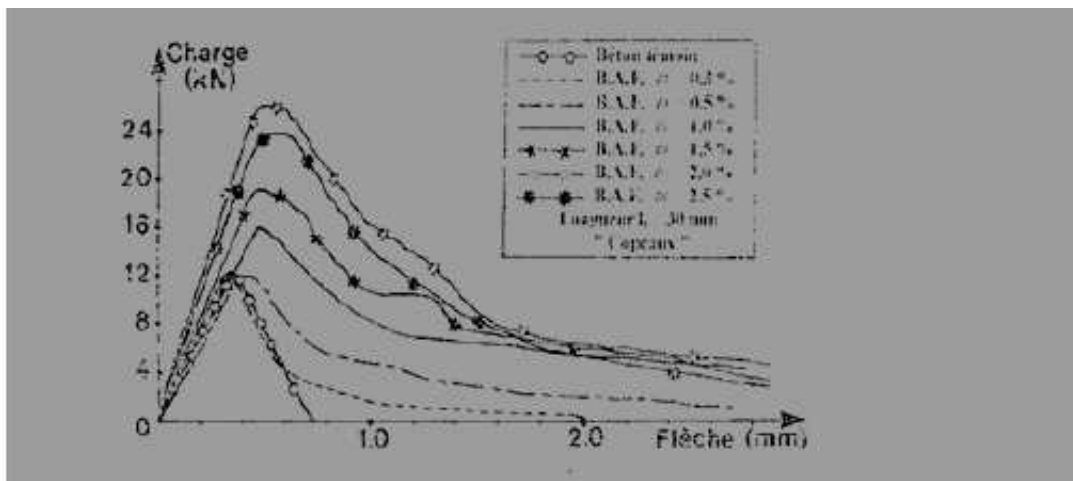
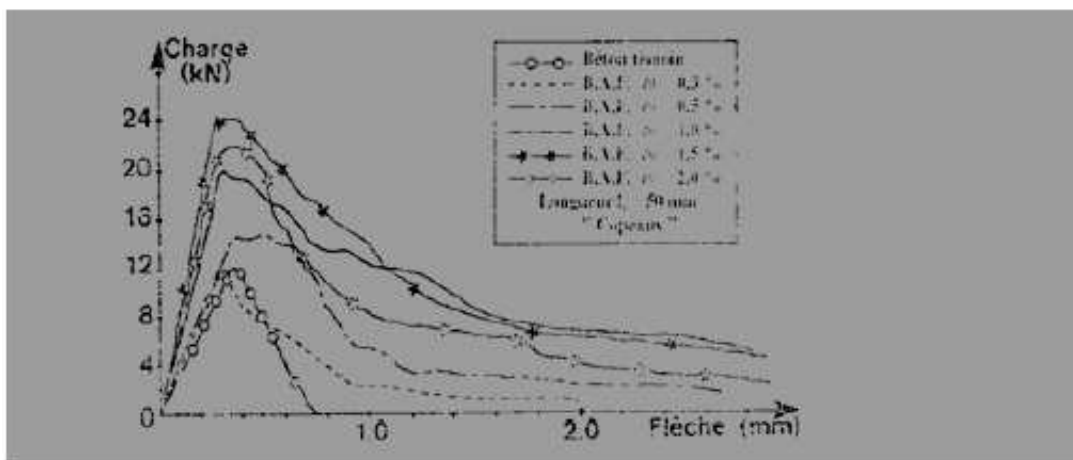


Figure 1.20: Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un **BFM** en fonction du pourcentage de fibre [25].

La (figure 1.21) 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 toute 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 augmente en fonction du pourcentage en fibres. [28]



$l_f = 30$ mm



$l_f = 50$ mm

Figure 1.21: Influence de la longueur des fibres sur la résistance à la traction par flexion [28]

1.2.10.3. Influence de la longueur de fibres

Les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les

longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité (voir Figure 22, a et b). [19]

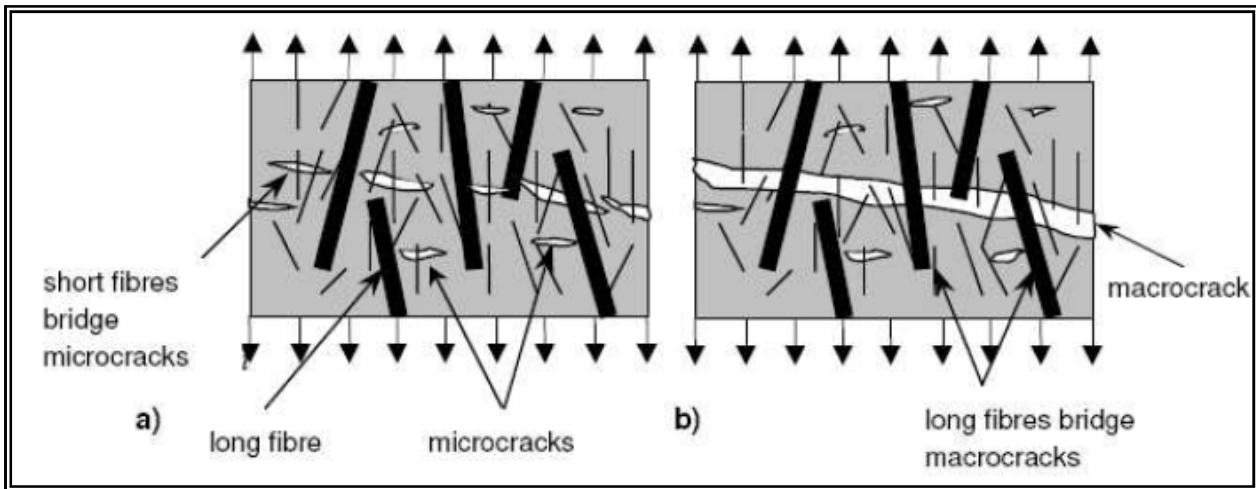


Figure 1.22: Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures [19].

1.2.10.4. Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique du BFM

L'orientation préférentielle des fibres est essentiellement causée par la mise en place du béton dans les moules ou les coffrages. Lors du coulage, les fibres s'orientent suivant l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure que le béton remplit le coffrage. Cette orientation préférentielle est donc inévitable au voisinage des parois (effet de paroi). La mise en oeuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons ordinaires sans fibres.

La vibration interne peut aussi mener à une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de vibration, ainsi qu'à de la ségrégation. L'utilisation de la table ou de l'aiguille vibrante conduit à une orientation préférentielle différente des fibres. [19]

Casanova [29] a réalisé une étude de l'influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique en traction des éprouvettes en béton renforcé de fibres métalliques.

Il a effectué des carottages suivant trois directions sur un bloc de béton (le coulage étant effectué suivant un axe vertical). La (figure 1-23) résume les résultats des essais de traction directe effectués sur ces carottes relatives aux trois directions.

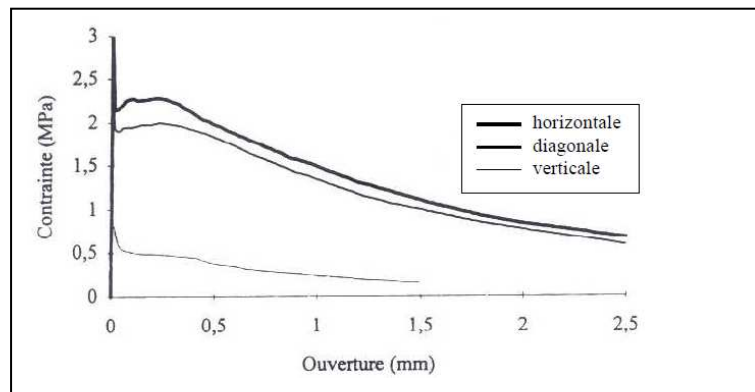


Figure 1-23 Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [29].

Casanova [29] a remarqué une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement mécanique en traction suivant les trois directions. En effet, lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure (carottes horizontales), les éprouvettes présentent un bon comportement à la traction, avec une meilleure résistance résiduelle. Dans ce cas, les fibres assurent un transfert optimal des contraintes à travers la fissure. A l'inverse, lorsque les fibres sont orientées préférentiellement parallèlement au plan de la fissure (carottes verticales), ce comportement est semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres. Dans le cas intermédiaire (carottes diagonales), le comportement post-pic est amélioré, mais de façon limitée en raison de l'orientation des fibres intermédiaire.

1.2.10.5. Influence de 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 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 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 15 mm), c'est la raison qui fait que les bétons de sable se révèlent compatibles à l'inclusion des fibres.

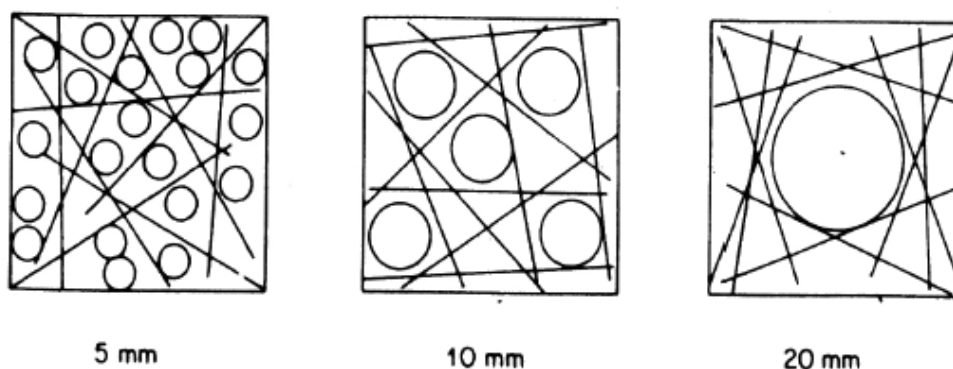


Figure 1.24: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre. [29]

1.2.10.6. 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 [30]

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

1.2.11. Comportement mécanique des bétons de fibres

1.2.11.1. Résistance en compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences. Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : celui en premier de maintenir les fissures ce qui favorable pour la phase post pic, et celui en second de créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer à l'endommagement et donc limiter la charge maximale. [20]

Le comportement en compression du béton renforcé de fibres se résume en trois phases qui sont les trois parties indissociables du diagramme effort-déformation [28]

- La première phase, avant microfissuration, est traduite par une partie linéaire de la courbe Effort –déformation: celle-ci est indiquée à celle du béton témoin pour toute valeur de l'effort

inférieur 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 deuxième phase est représentée par un diagramme courbé, durant laquelle la courbe à un B.F.M 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 de la du pic, d'une énergie, produisant ainsi un comportement ductile et corrélativement une augmentation de la déformation à la rupture voir (figure 1.25).

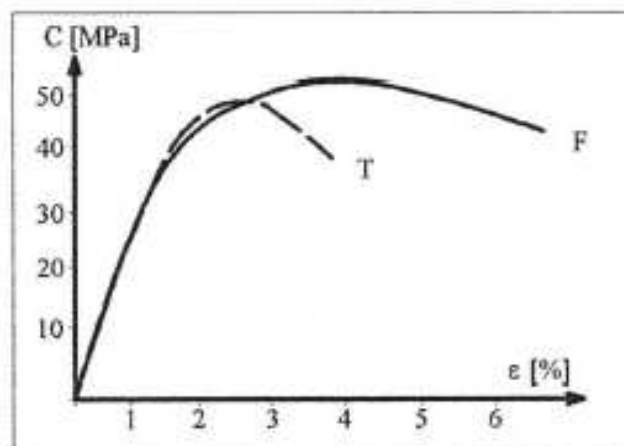


Figure 1.25: Courbe contrainte déformation en compression simple [28]

Avec: **T**, béton de fibre

F, béton de fibres métalliques à rochets, différentes compositions de matrice sont testées

FENELLA.D.A AT AL (1985) ont montré, de part l'expérience, que plus le dosage en fibre et considérable, plus la dispersion de la partie descendante du courbe effort déformation est significative. La (figure1.26) qui suit nous montres que le renforcement du béton par des fibres se trouve sensiblement plus résistant, et nettement plus ductile. [28]

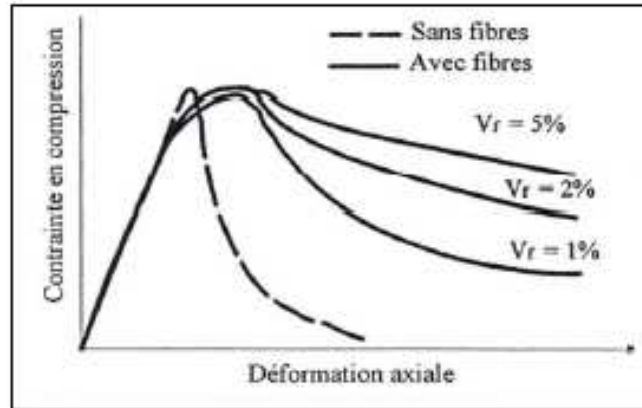


Figure 1.26: L'influence du dosage en fibres lors d'un essai de compression [28]

Les chercheurs montrent une amélioration qui n'est pas significative pour toutes les étapes de développement de cette résistance. Cette amélioration ne dépasse pas 5% à 28 jours d'âge du béton pour une quantité idéale de fibre (1%) et donc pourrait être considérée comme insignifiante au vu des conditions d'essai et des incertitudes de lecture.

L'objectif n'est cependant pas d'améliorer la résistance en compression du matériau du fait qu'elle est déjà suffisamment élevée pour un béton à haute résistance, mais essentiellement d'améliorer le comportement du matériau vis à vis de la traction, améliorer sa ductilité, son comportement vis à vis de la fatigue et de l'usure face aux changements d'impact et chargements répétés et enfin améliorer sa résilience.

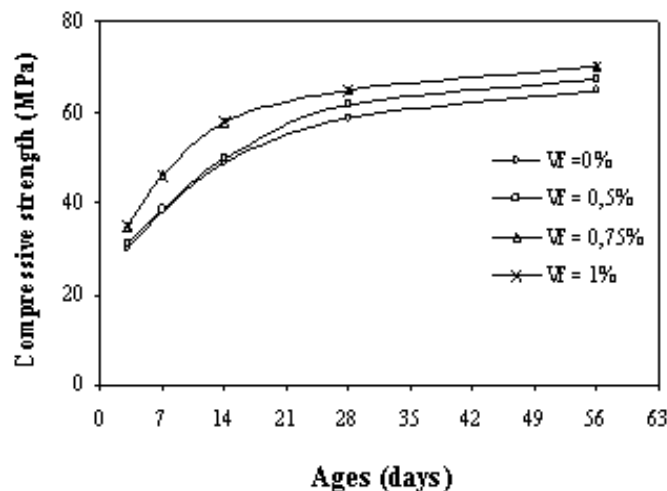


Figure 1.27 : Résistance à la compression [17]

ZHAN (1991), a montré que les fibres métalliques dans le béton (comparativement à un béton témoin) augmentent sa résistance de 20%. Dans la série d'essais qu'il a entrepris sur des éprouvettes asservies avec un âge de 227 jours. Il a constaté que ce plus en résistance est beaucoup plus faible (de l'ordre de 7%). [28]

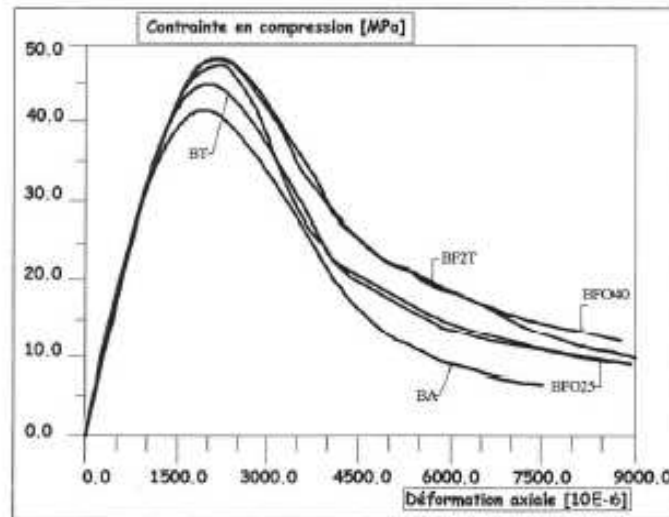


Figure 1.28 : Courbe contrainte déformation des essais de compression faits sur des éprouvettes asservies [28]

Dans le cas d'un béton à haute performance renforcé par des fibres métalliques *Shakir A.Salih, Saeed K. Rejeb, Khalid B. Najem* ont montré que L'ajout des fibres métalliques (0,5% et 1%) au béton à haute performance mène à augmenter la résistance à la compression du BHP, mais dans le cas de 1,5% de fibres métalliques, la résistance à la compression diminue (figure 1.29). Cette diminution a été attribuée à l'augmentation des vides d'air en béton dû à une augmentation du rapport eau/ciment, qui est exigé pour maintenir une ouvrabilité donnée. Les augmentations de pourcentage étaient 0.89%, 11.57% et 21.6% à 7, 28, et 90 jours, respectivement. [31]

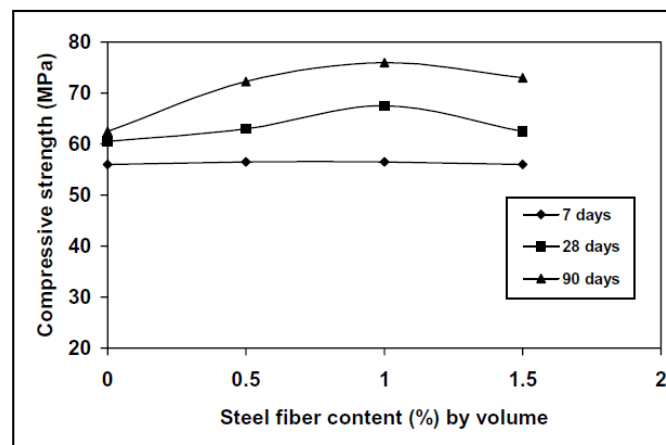


Figure 1.29: effet du % fibres métalliques sur la résistance en compression à différent âges du béton [31]

1.2.11.2. Résistance en traction par flexion

Une étude a été effectuée sur un béton renforcé de fibres de dramix et les fibres en copeaux de longueur de 50 mm et 30 mm. Les corps d'éprouvettes sont de forme prismatique de dimension 100 x 100 x 400 mm, ils sont soumis à l'essai 28 jours après le coulage reposent sur deux appuis distants de 300 mm (centré) et sont soumis à une charge verticale, appliquée au milieu de la travée centrale. La charge est appliquée progressivement à vitesse de chargement contrôlée et ce jusqu'à la rupture pour chaque type de béton. [32]

La courbe charge-flèche et ensuite enregistrée dans la (figure 1.30)

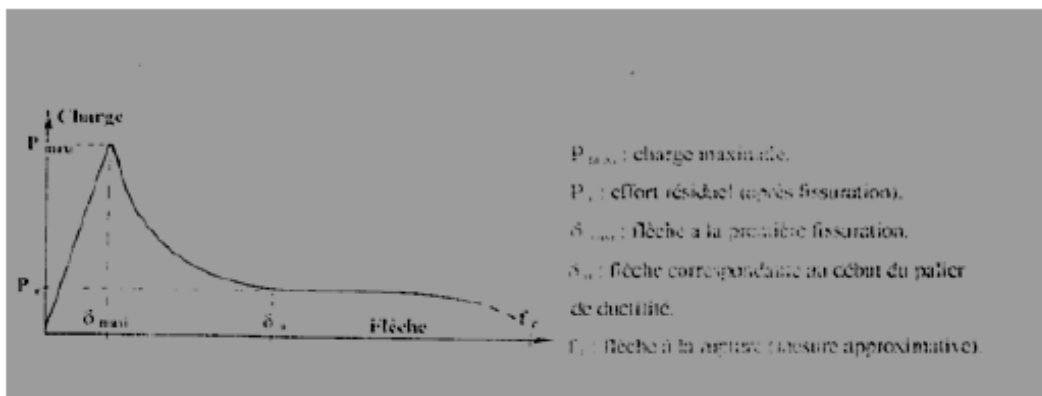


Figure 1.30: Allure de courbes charge-flèche. [32]

La courbe comporte une première phase, élastique linéaire jusqu'à atteindre de l'effort maximal correspondant à l'apparition de la première fissure. Cet effort maximal est fonction du pourcentage de fibres.

A deuxième phase est caractérisée par une branche descendante plus au moins ductile. A ce stade les fibres sont sollicitées en traction. Elles interviennent en "causant" les fissures et en limitant sur leur ouverture, la longueur des fibres ainsi que le pourcentage deviennent des paramètres importants. En effet, l'effort nécessaire à l'arrachement des fibres est fonction de longueur d'adhérence et du système d'encrage (crochet pour les fibres dramix). En ce qui concerne le pourcentage, plus celui-ci est important plus le nombre de fibres cousant la matrice est important. Dans la troisième phase, la courbe tend à s'aplatir et ne s'annule qu'après une grande déformation. Il y a une réduction des efforts due à l'existence des fibres au niveau de la fissure. Cet effort qui permet au matériau de résister encore est appelé effort résiduel. La rupture survient ensuite soit par arrachement, soit par rupture des fibres. [32]

Dans le cas d'un béton à haute performance renforcé par des fibres métalliques *Shakir A.Salih, Saeed K. Rejeb, Khalid B. Najem* ont montré une augmentation de La résistance à la traction par flexion du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques jusqu'à 1,5% (figure 1.31). Cette augmentation à été attribué au rôle des fibres métalliques en libérant l'énergie de rupture. [31]

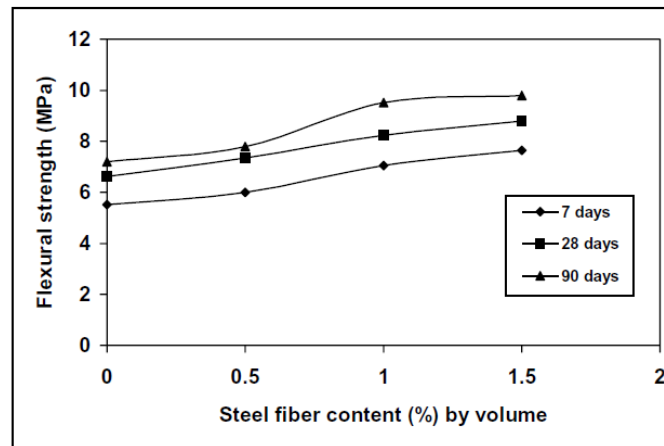


Figure 1.31: effet du % fibres métalliques sur la résistance en traction par flexion à différent âges du béton [31]

1.2.11.2. Résistance en traction par fendage

Dans le cas d'un béton à haute performance renforcé par des fibres métalliques *Shakir A.Salih, Saeed K. Rejeb, Khalid B. Najem* ont montré aussi que la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques (figure 1.32). Un béton à haute performance avec 1,5% de fibres métalliques a montré une augmentation supérieure de la résistance à la traction par fendage. Les augmentations de la résistance à la traction par fendage du BHP relatif au pourcentage des fibres étaient 64,28%, 63.86% et 66.66% à 7, 28 et 90 jours, respectivement. [31]

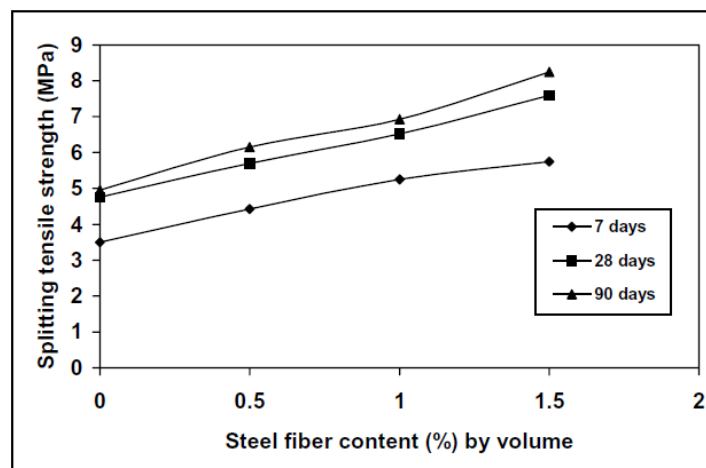


Figure 1.32: effet du % fibres métalliques sur la résistance en traction par fendage à différent âges du béton [31]

1.2.12. Formulation des bétons de fibres

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué durant ces dernières années. Tout d'abord, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables et de dimensions tout en tenant compte que l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste.

L'approche scientifique du béton s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues :

- L'empilement sec dont on cherche à prévoir la compacité et la ségréabilité,
- L'empilement humide (béton frais) intéressant par ses propriétés rhéologiques,
- L'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une matrice de pâte de ciment durci. [20] On peut ainsi définir la formulation comme :

Tableau 1.7: Définition de la formulation [20]

Formulation classique d'un béton		
Maniabilité	Résistance à la compression	
Problème actuel de la formulation des bétons		
Davantage de variables	Espace de recherche beaucoup plus grand	Davantage de dimensions
Approche scientifique du béton		
Analyse de la structure granulaire		
Trois étapes parcourues		
L'empilement sec : compacité et ségréabilité	L'empilement humide (béton frais) : propriétés rhéologiques	L'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une pâte de ciment durci

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

conséquence de diminuer la maniabilité du matériau et d'altérer sa compacité. Il est évident que cette perturbation est d'autant plus importante que le pourcentage de fibres est élevé. D'après **P.Rossi** une méthode expérimentale de formulation largement validée et utilisée en France, utilisée pour la formulation des bétons de fibres cette méthode s'appelle la méthode de "**Baron-Lesage**". [25]

1.2.12.1. Description de la méthode

Il s'agit de la méthode Baron-Lesage qui a été développée au laboratoire central des ponts et chaussées, il y a quinze ans, pour optimiser le squelette granulaire des bétons non fibrés. Cette méthode est fondée sur trois hypothèses principales:

- ❖ pour un rapport eau/liant fixé au départ, le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire (G+S) le plus compact,
- ❖ Les proportions optimales en granulats dépendent peu de la nature et du volume du liant,
- ❖ L'introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

De manière pratique, la méthode se décompose en trois étapes:

- 1) Le cahier de charge d'un **BFM** permet généralement de fixer:
 - Le rapport eau/liant,
 - Le diamètre de plus gros granulats,
 - La géométrie et les dimensions de la fibre,
 - Le pourcentage de fibres,
 - La maniabilité souhaitée,
- 2) La variation du rapport massique (S/S+G) et la détermination de la maniabilité correspondante pour chaque valeur de ce rapport
- 3) Si la maniabilité voulue n'est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un superplastifiant.

Remarque :

- 1) Pour déterminer la maniabilité, on peut utiliser le cône d'Abrams ou le maniabilimètre LCL.
 - Le cône d'Abrams est un essai "statique". La maniabilité y est caractérisée par une hauteur d'affaissement,
 - Le maniabilimètre LCL est un essai dynamique qui met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous vibration. La maniabilité est alors caractérisée par le temps d'écoulement.

Dans le cas des **BFM**, il est préférable d'utiliser le second appareil et ceci pour deux raisons :

- lorsque le pourcentage des fibres est relativement important (supérieur ou égal à 50 kg/m³ par exemple), il devient très difficile d'observer des affaissements significatifs des **BFM**, ce qui rend imprécise la détermination du squelette minéral optimal (courbe plate),

- Le volume de matériau testé avec le cône d'Abrams est relativement faible, en l'occurrence 6 litres, alors que le maniabilimètre LCL opère sur 30 litres. Ce dernier permet donc d'accéder à une information plus représentative du comportement rhéologique du **BFM** frais, et particulièrement quand les fibres métalliques incorporées ont une longueur 50 à 60 mm de longueur.

2) La maniabilité souhaitée s'obtient, soit en ajustant la quantité de liant, soit en faisant varier la quantité de superplastifiant. Le choix entre ces deux possibilités dépend de leurs conséquences respectives:

- l'augmentation de la quantité de liant présente un intérêt double. D'une part, elle permet un meilleur enrobage des fibres, ce qui aura pour conséquence un fonctionnement mécanique ultérieur meilleur de celles-ci dans la matrice durcie et, d'autre part, elle conduit à une finition plus aisée de la surface des structures en **BFM** et à une surface moins "hérissée" de fibres, tant dans les parties coffrées que dans les autres. Cette possibilité génère également certains inconvénients tels une augmentation des retraits thermiques et hydrauliques, du fluage et de l'exothermie du **BFM**, donc à occasionner, éventuellement des problèmes mécaniques,
- L'inconvénient majeur de l'utilisation des superplastifiants est généralement sont des produits coûteux.

La modification du squelette granulaire d'un **BFM** par rapport à un béton sans fibres est que le squelette optimal très différent de celui d'un béton non fibré.

L'importance de cette modification est dépend de paramètre divers parmi lesquels on peut citer:

- Le type de fibres utilisées (type de matériau, forme géométrique, dimension de la fibre...),
- Le pourcentages des fibres,
- Le rapport longueur de la fibre / diamètre du plus gros granulat (L_f / Φ_g),
- Le rapport $(S / S + G)$ augmente avec le pourcentage de fibres et avec le rapport (L_f / Φ_g) lorsque celui-ci varie entre 1 et 3 ($L_f / \Phi_g = 1$ à 3),
- Pour $1 > L_f / \Phi_g > 3$, seul intervient de manière significative le pourcentage des fibres.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire localement, c'est à dire autour de chaque fibre par un «dessalement» du squelette granulaire, similaire à un effet de paroi. Ainsi, un certain volume des plus gros granulats va être « remplacé » par un certain volume de fibres, ce qui contribue à un « enrichissement » en éléments fins du squelette granulaire. Cette modification de l'empilement granulaire est schématisée dans la (figure 1.33) suivante. On analyse le problème tridimensionnel de cet empilement par une analyse bidimensionnelle.

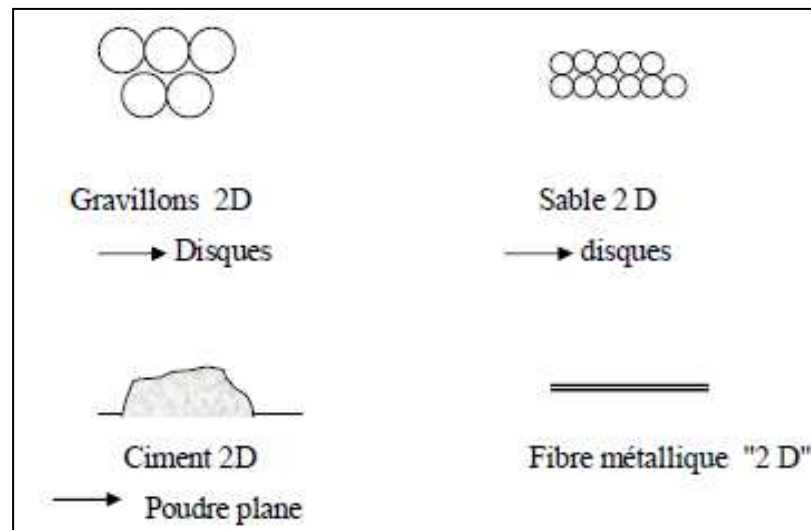


Figure 1.33: Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BFM [25]

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

On doit prendre en considération que :

La composition des **BFM** est complètement différente de celle d'un béton courant, ce qui se traduit le fait qu'un composite fibré ne s'obtient pas en introduisant simplement des fibres dans une matrice cimentaire donnée.

- Du point de vue de la maniabilité et de la compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire à celui des gros gravillons,
- La méthode de composition utilisée conduit à des **BFM** contenant beaucoup de pâte de ciment, ce qui est très bénéfique vis-à-vis de l'adhérence entre les fibres et la matrice. [20]

1.2.13. Les avantages du béton de fibres

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

a) 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

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

b) 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.

1.2.14. Domaines d'application des BFM et BHPFM

Les bétons de fibres trouvent leur application dans plusieurs domaines, grâce à leurs propres caractéristiques (renforcement homogène du béton, économie de la main d'oeuvre, simplicité de mise en oeuvre, comportement lors de la fissuration, sa ductilité). Parmi ces domaines on cite :

- Le domaine du bâtiment,
- Le domaine des travaux publics,
- Le domaine du Génie Civil autre que les bâtiments et les travaux publics,
- Le domaine en dehors du Génie Civil,
- Cas particulier des bétons à ultra-hautes performances fibrés.

1.2.14.1. Le domaine du bâtiment

a) Applications actuelles

L'utilisation actuelle des bétons de fibres métalliques dans le domaine du bâtiment concernant, principalement, les dallages industriels, les pieux forés à la tarière creuse, et les bétons projetés fibrés de réparation.

- le dallage industriel en béton de fibres métalliques; paraît plus intéressant que le dallage non armé, car l'ajout des fibres permet de diminuer l'épaisseur et le nombre de joints du dallage,
- Les pieux forés à la tarière creuse ; Il est très difficile d'introduire correctement, sur une grande profondeur, une cage d'armature, le plus souvent, les armatures touchent le sol à la périphérie du pieu, devant cette difficulté technique, les fibres métalliques se sont

naturellement imposées, car, étant mises en place en même temps que le béton, elle ne pose aucun problème de mise en œuvre,

- les bétons projetés de réparation ; La corrosion des armatures de béton armé est à l'origine des pathologies les plus fréquents pour les structures en béton armés. En effet, cette corrosion, en plus de réduire la capacité de renforcement des armatures, peut conduire à l'éclatement du béton d'enrobage, ce qui augmente l'accélération de la corrosion des armatures qui ne sont plus protégées. Pour reconstituer le béton d'enrobage consiste à utiliser du béton projeté. L'utilisation de béton de fibres métallique est alors une solution intéressante.

b) Applications actuelles

- Les dallages industriels sans joints,
- Les pieux forés à la tarière creuse en zone sismique,
- les voiles extérieurs en béton banché,
- les poutres et planchers en béton de fibres métalliques,
- les panneaux de façades et plus généralement les éléments minces,
- les dalles alvéolées.

1.2.14.2. Le domaine des travaux publics

a) Applications actuelles

- béton projeté pour soutènement provisoire de tunnel,
- le béton projeté de réparation,
- les pieux forés à la tarière creusent,
- le surfacage des chaussées, et des pistes aéroportuaires, en béton.

b) Applications potentielles

- les pieux forés à la tarière creusent dans les zones sismiques,
- les revêtements définitifs de tunnel en béton de fibres métalliques,
- les parois coulées,
- les chaussées et les pistes aéroportuaires sans joint,
- les dalles de pont mixte,
- les parois moulées,
- le renforcement des buses métalliques corrodées à l'aide de coque, plus ou moins rigides en béton de fibre métallique projetées.

1.2.14.3. Le domaine du Génie Civil autre que les bâtiments et les travaux publics

a) Applications potentielles

Une application mise en oeuvre in situ, pourrait être intéressante, de développer dans les années à venir : Il s'agit des aéroréfrigérants de centrale nucléaire.

b) Préfabrication

L'utilisation des bétons de fibres métalliques dans les tuyaux d'assainissement, repose sur les raisons suivantes :

- Rapidité de fabrication des tuyaux,
- Diminuer l'épaisseur des tuyaux,
- Eviter les investissements importants relatifs aux machines qui forment les armatures de tuyaux.

1.2.14.4. Le domaine en de hors du Génie Civil

Il existe un certain nombre d'applications industrielles de béton de fibres en dehors de Génie Civil.

On peut citer:

- Les fosses toutes eaux,
- Les séparateurs d'hydrocarbure.

1.2.14.5. Cas particulier des bétons à ultra-hautes performances fibrés. [25]

1.2.15. Exemple d'application



Figure 1.34: Musée océanographique à Valencia



Figure 1.35: Tunnel de Barcelone



Figure 1.36: Eléments de toit en Italie



Figure 1.37: Shepherd's Gully Bridge, Australie

CHAPITRE 2

MATERIAUX DE

COMPOSITION

DES BHPFM

2. MATERIAUX DE COMPOSITION DU BHPFM

Plusieurs méthodes de formulation du BHP existent. Le BHP peut être obtenu avec toute sorte de ciment et réducteur de l'eau. Dans notre travail, pour formuler un BHP, on s'est basé sur deux points essentiels:

- un choix rigoureux des constituants de mélange, reflétant l'aspect qualitatif,
- le proportionnement de ces constituants, reflétant l'aspect quantitatif.

En effet, différentes recettes sont proposées pour obtenir un béton de rendement élevé. [33]

2.1. LES GRANULATS

Les granulats occupent environ 70% du volume de béton et par conséquent, ont une influence directe sur les propriétés matérielles à l'état frais et à l'état durci du béton [33]

Les principales divisions granulométriques des granulats sont données par la norme XP P 18-540 :

- fillers 0/D ou $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm,
- sables 0/D ou $D \leq 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm,
- sables 0/D ou $1 < D \leq 6,3$ mm,
- graves 0/D ou $D > 6,3$ mm,
- gravillons d/D ou $d \geq 1$ et $D \leq 125$ mm,
- ballasts d/D ou $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

Si l'on veut fabriquer un béton à hautes performances, le choix des granulats est très important pour avoir une bonne résistance à la compression. En effet, en générale, avec les granulats utilisés couramment dans la fabrication des bétons ordinaires, on peut confectionner des bétons dont la résistance à la compression peut aller jusqu'à 70 MPa (à condition que ces granulats soient bien gradués et propres). [34]

D'une manière générale, pour l'obtention d'un BHP, le choix du type du granulat est très important pour obtenir une bonne résistance :

2.1.1. Granulats fins

Les granulats fins à employer pour la confection d'un BHP doivent avoir un module de finesse supérieur à 2,8. Un module de finesse plus petit que 2,5 donne un BHP "collant" et difficile à rendre compact et par conséquent, moins résistant. D'ailleurs, les granulats fins avec un petit module de finesse ont une surface spécifique plus importante et consomment plus d'eau. Les particules de sable doivent avoir une forme ronde -ou au moins cubique- et ne doivent pas avoir des formes prolongées. Dans ce cas, La surface spécifique sera réduite et ceci réduira la quantité de l'eau de mélange requise.

Les formes irrégulières exigent beaucoup plus d'eau et doivent être, donc, évitées.

2.1.2. Granulats gros

Le choix des gros granulats dépend de beaucoup de facteurs tels que la forme, la taille, la force, la rigidité et la minéralogie des particules.

2.1.2.1. Forme et taille

Les granulats concassés ont une surface plus approximative que le gravier normale et développent un meilleur collage avec la pâte et par conséquent une meilleure résistance. Le gain de la compacité du gravier formé rond est ouvrable par leur lien faible avec pâte du ciment. Cependant, les formes irrégulières des granulats concassées peuvent "poinçonner " et exiger également plus d'eau de mélange pour le béton. Pour réaliser un bon BHP, les granulats doivent être concassés avec une surface propre ayant une forme régulière.

En ce qui concerne la taille de l'agrégat, elle doit être comprise entre 9.5 et 12.5 millimètres. Dans ce cas, le béton donne une très bonne résistance.

3.2.1.2. Résistance mécanique

Pour produire un béton à haute performance, le granulats ne devrait pas se casser facilement. Un granulats plus fort est nécessaire pour réaliser de plus hautes résistances pour le béton

3.2.1.3. Rigidité

Des différences plus élevées entre le module d'élasticité de granulats et celui de la pâte durcie de ciment induit une concentration d'effort autour de l'agrégat, qui peut affecter négativement le lien entre les deux constituants du béton durci. Le granulats utilisé dans le BHP doit avoir un module élastique comparable à cela de la pâte de ciment. Ceci réduit au minimum la déformation différentielle à la pâte de granulats-ciment d'interface. [33]

2.2. CIMENT

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale, obtenue 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, qui s'hydrate en présence d'eau, il forme une pâte, qui durcit progressivement, en réagissant avec l'eau.

Le ciment est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Les principaux constituants du ciment Portland sont :

- Les silicates tricalciques (alite) : $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C₃S]
- Les silicates bicalciques (belite) : $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C₂S]
- Les aluminates tricalciques : $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C₃A]
- Les aluminoferrites tétracalciques : $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C₄AF]

- Autres : (sulfates, alcalins, impuretés, . . .)

Les silicates de calcium C_3S et C_2S 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 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge. [35,36, 37]

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de la durabilité du béton, sont directement liés aux caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de base de la pâte de ciment hydraté.

Le choix du ciment pour le BHP est extrêmement important si l'obtention d'une résistance initiale très élevée est demandée. Pour fabriquer un BHP, il est recommandés d'utiliser les ciments Portland artificiels (CPA), composé de plus de 97% de clinker, car ils assurent une bonne résistance mécanique et donnent une bonne compacité à la pâte liante.

Les ciments Portland artificiels conduisent à des meilleures maniabilités, avec un rapport E/C le plus faible comme c'est le des ciments de classe 55 (CPA 55) ou les ciments à hautes performances (CPA HP) à faible teneur en C_3A , ou les HTS (haute teneur en silice). [38]

2.2.1. Hydratation du ciment

Le ciment est un liant hydraulique ; il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Les mécanismes fondamentaux de l'hydratation du ciment ont été mis en lumière, dès la fin du siècle dernier, par Henri Le Chatelier. Il a notamment décrit les trois phénomènes qui concourent au phénomène de prise:

- la dissolution des constituants du ciment dans l'eau,
- la formation de solutions sursaturées par rapport aux différents hydrates,
- la précipitation et la cristallisation de ces hydrates dans les vides intergranulaires. [39]

2.2.1.1. Hydratation des composants du ciment Portland

Lorsque le ciment entre en contact avec l'eau, une réaction exothermique instantanée se produit avec une forte libération de chaleur. Cette période dite de pré-induction est de courte durée (10 – 20 minutes). Elle est suivie d'une période relative inactivée appelée période d'induction ou période dormante au cours de laquelle le dégagement de chaleur est faible, mais jamais nul. La durée de cette période peut varier entre 2 et 8 heures.

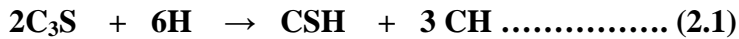
La période d'induction est très importante quant à l'ouvrabilité des bétons et mortiers, car, à sa fin, s'amorce la prise du ciment avec un fort dégagement de la chaleur qui correspond à la période d'accélération associée au début de prise et de durcissement du ciment.

Pour comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

2.2.1.2. Hydratation du silicate tricalcique C_3S

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium.

La réaction du C_3S avec de l'eau est la suivante:



Où $\left\{ \begin{array}{l} CSH \text{ représente le } 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O \text{ (Silicate de calcium hydraté) et} \\ CH \text{ représente le } Ca(OH)_2 \text{ (Portlandite).} \end{array} \right.$

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C_3S (figure 2.1) sont:

- les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales,
 - l'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.
- [40]

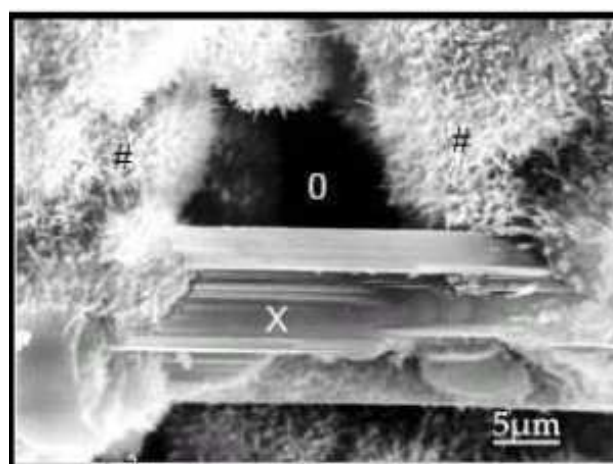


Figure 2.1: CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) [41]

2.2.1.3. Hydratation du silicate bi calcique C₂S

Une fois hydraté, C₂S donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:



Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C₃S, mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stoechiométrie, l'hydratation de C₃S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C₂S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C₂S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C₃S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

2.2.1.4. Hydratation de l'aluminate tricalcique C₃A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO₄ 2H₂O). En l'absence du gypse, la réaction de C₃A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C₃A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (figure 2.2). La réaction est donnée par:

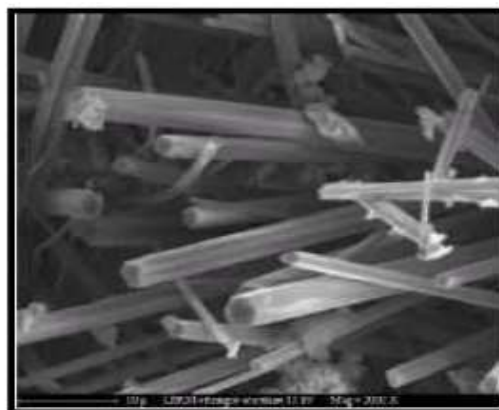
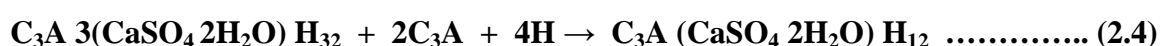


Figure 2.2- Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [42].

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer toutes les aluminates en éttringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate, qui se cristallise en plaquettes hexagonales. [43] La réaction est donnée par:



2.2.1.5. Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A , mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C_4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C_4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance. [40]

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique, parce qu'elle affecte les propriétés de prise du ciment.

2.3. LES ADJUVANTS

La découverte vers la fin des années soixante-dix des propriétés dispersantes exceptionnelles des superplastifiants a permis à la technologie du béton de faire un pas de géant. Il est devenu possible de fabriquer des bétons fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons de très faible rapport E/C faciles à mettre en oeuvre.

Comme toutes les poudres mélangées dans un liquide, les grains de ciment ont tendance à s'agglomérer entre eux du fait de la polarité de ce liquide. Les grains de ciment ont un diamètre moyen de 10 à 50 microns. Lorsqu'ils sont mis en oeuvre dans le béton, ils ne restent pas isolés et se regroupent pour constituer des agglomérats (des floccs) bien plus gros, qui ont une dimension de 500 à 800 microns. Ces floccs piègent de l'eau qui, ainsi, n'apporte pas l'ouvrabilité que l'on voudra.

Pour résoudre cela, il existe des adjuvants chimiques ou des produits défloculants [44], qui permettent d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment. Grâce à ces produits défloculants, les bétons présentent une meilleure rhéologie. Les grains étant mieux répartis, la résistance est plus homogène et plus améliorée. Les adjuvants sont classés par la norme NF EN 934-2. Suivant leurs actions principales en :

- Plastifiant/réducteur d'eau,
- Superplastifiant/haut réducteur d'eau,
- Rétenteur d'eau,
- Entraîneur d'air,
- Accélérateur de prise,
- Accélérateur de durcissement,
- Retardateur de prise,
- Hydrofuge de masse,
- Plastifiant/réducteur d'eau / retardateur de prise,
- Superplastifiant / haut réducteur d'eau/retardateur de prise,
- Plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise.

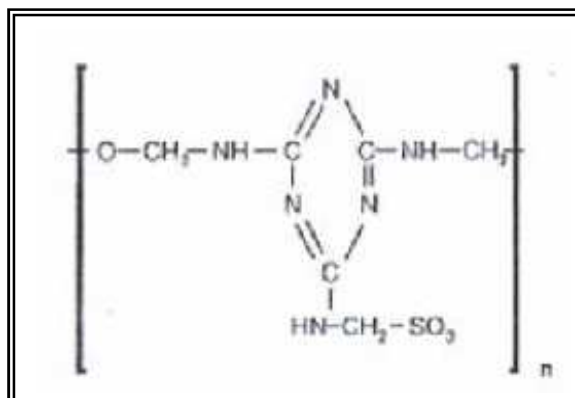
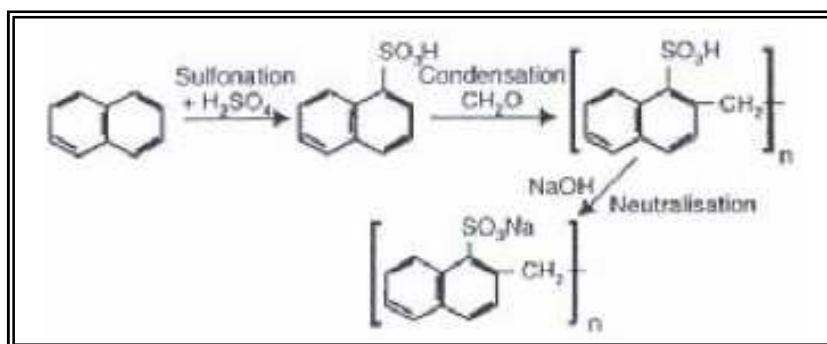
Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz. Parmi les adjuvants chimiques les plus utilisés, il y a les superplastifiants.

2.3.1. Définition de superplastifiant

Un superplastifiant haut réducteur d'eau est un adjuvant qui, sans modifier la consistance, permet de réduire fortement la teneur en eau d'un béton donné.

2.3.2. Description de supe plastifiant

Les superplastifiants hauts réducteurs d'eau sont des polymères de synthèse, fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de poly-naphtalène sulfoné, de poly-mélatamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester (polycrylate), ou de lignosulfonate de grande pureté; les plus utilisés sont les deux premiers qui sont communément appelés superplastifiants à base de naphtalène (figure 2.3) et superplastifiant à base de mélatamine (figure 2.4), respectivement.



Les superplastifiants 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 et sont de ce fait relativement chers (figure 2.3 et 2.4)

Vers la fin des années 70, les superplastifiants étaient utilisés surtout pour fluidifier les bétons en utilisant des doses réduites qui ne dépassaient pas 01 à 02 litres par mètre cube. Dans ce cas, l'action fluidifiante est limitée dans le temps, car les molécules de polymère ne se trouvent pas en nombre

suffisant pour neutraliser tous les sites actifs libérés suite à la meilleure dispersion des grains de ciment (figure 2.5).

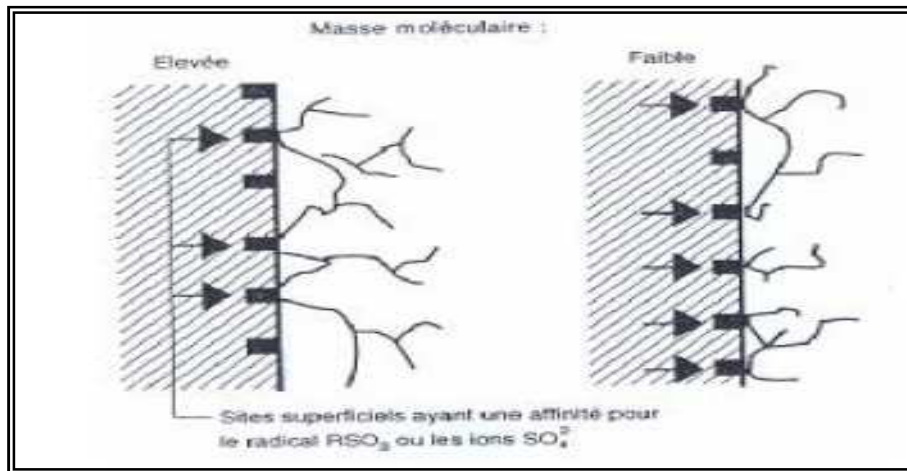


Figure 2.5 : Illustration schématique du blocage des sites réactifs par les molécules d'un superplastifiant, selon Jolicoeur & al [45]

De nos jours, les superplastifiants sont utilisés à des dosages beaucoup plus élevés qui atteignent deux à vingt litres par mètre cube et permettent la confection de bétons de très grande maniabilité ou des bétons à hautes performances (figure 2.6).

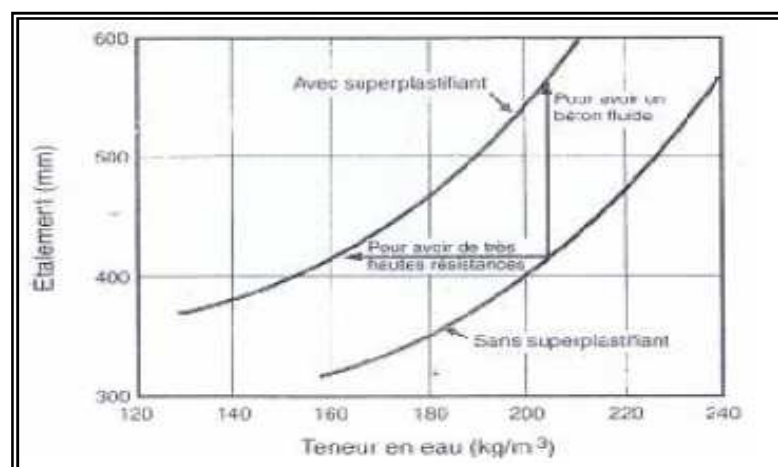


Figure 2.6 : Relation entre l'étalement et le dosage en eau d'un béton avec et sans superplastifiant, selon Meyer [45]

Pour un rapport eau/ciment et une teneur en eau donnés dans le béton, l'action dispersante des superplastifiants, augmente considérablement la maniabilité du béton sans qu'il perde sa cohésion. Un tel béton peut être mis en place avec peu ou pas de serrage et n'est sujet ni à un ressuyage excessif ni à la ségrégation, d'où sa désignation de béton fluide.

La seconde utilisation des superplastifiants est la confection des bétons à maniabilité normale (Figure 2.7), mais ayant une très grande résistance en raison d'une réduction substantielle du rapport eau/ciment.

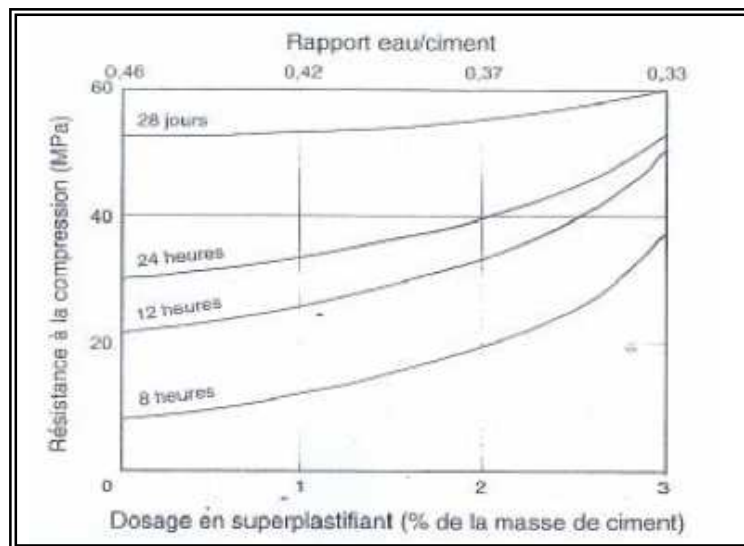


Figure 2.7 : Influence d'un superplastifiant sur la résistance à jeune âge d'un béton dosé à 370 kg/m³ de ciment à maniabilité constante, selon Meyer [45]

2.3.3. Mécanisme d'action de superplastifiant

Après la clinkérisation, les grains de ciment sont généralement chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage (Baron, 1982). Les grains de ciment anhydres sont généralement plus chargés négativement que positivement du fait des conditions de broyage. Une certaine cohésion entre les grains de ciment existe de ce fait, et les maintient "collés" les uns aux autres. Cette cohésion est associée à des phénomènes d'attraction électrique entre plages de signes différents à la surface des grains ainsi qu'à des forces dites de Van der Waals. L'effet des adjuvants (molécules polaires organiques à extrémité fortement chargée) est de neutraliser un site opposé sur les grains de ciment par adsorption à la surface et de disperser les particules de ciment en diminuant les forces capillaires (par abaissement de la tension superficielle) dans le cas de la présence de ménisques d'eau et en créant des forces opposées (électrostatiques et/ou stériques) aux forces de cohésion colloïdale du type Van der Waals qui sont à l'origine des agrégations des particules (Figure 2.8). Cette libération de l'eau initialement piégée, permet de supprimer un volume important d'eau non mobilisée pour l'hydratation du ciment. Les rapports E/C peuvent passer de 0,5 à 0,35, soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30%, voir plus selon le pouvoir dispersant du polymère. L'efficacité de la dispersion dépend quant à elle de la fonctionnalité du polyélectrolyte, de sa configuration structurale, de sa masse moléculaire moyenne, de sa polydispersité, de l'épaisseur de la couche adsorbée et de sa densité de charge.

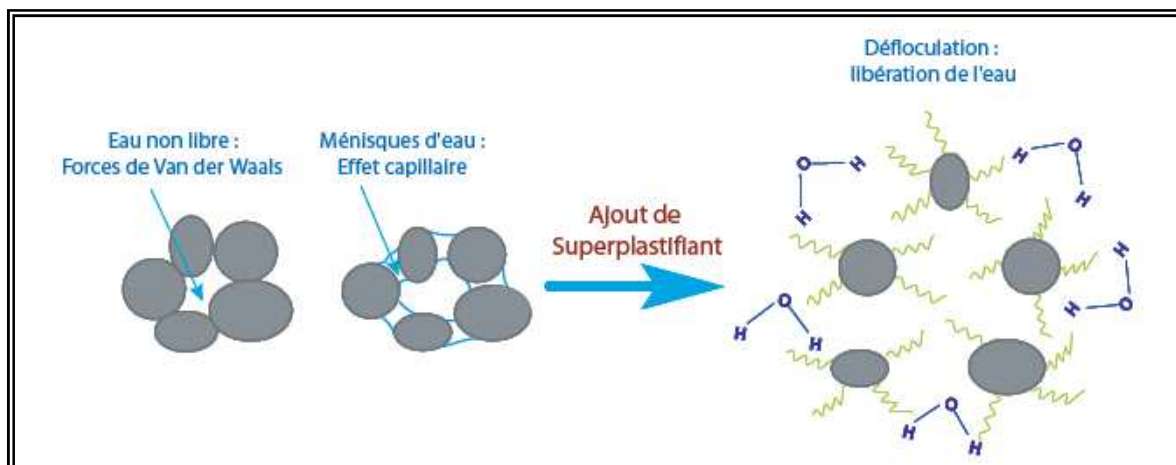


Figure 2.8 : Dispersion des grains de ciment par l'ajout du polymère [7]

L'élimination de l'eau en excès à l'origine de la diminution de la porosité capillaire, ainsi que la libération des surfaces de ciment qui sont au contact de l'eau permettent d'améliorer la réactivité (hydratation) et la résistance à court terme des bétons à hautes performances. Cependant, un excès de polymères peut entraîner des phénomènes secondaires néfastes tels que l'apparition de grosses bulles d'air, la ségrégation des particules de ciment du fait de la diminution des forces électrostatiques qui les maintient, ou encore un fort retard à la prise du ciment. [7]

Lorsque les molécules organiques des superplastifiants sont introduites dans une suspension d'un matériau cimentaire, une grande partie d'entre elles viennent se fixer à la surface des particules de ciment (adsorption). Ces dernières réduisent les forces attractives d'interactions inter-particulaires qui existent entre les atomes des différentes particules (figure 2.8). Si les molécules sont ionisées dans le liquide, elles modifient également les forces d'interactions de double couche qui apparaissent suite à la réaction acide-base entre les atomes de surface et le liquide, en augmentant les forces de répulsions entre les particules et engendrent donc des effets importants de fluidification ou d'épaississement des suspensions (figure 2.9).

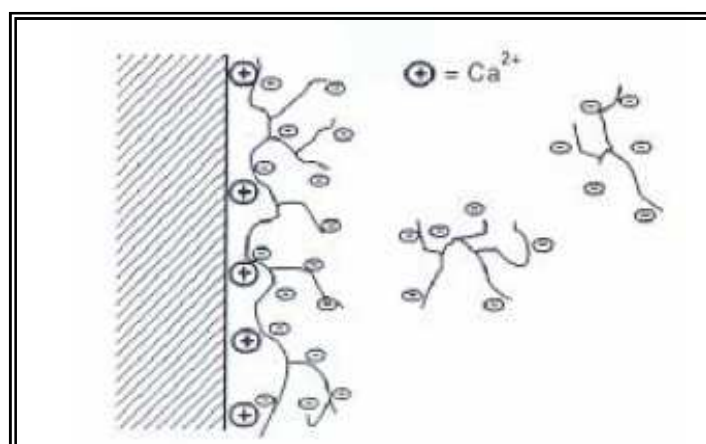


Figure 2.9 : Représentation schématique de l'adsorption d'un polymère à la surface d'une particule selon Jolicoeur & al [45]

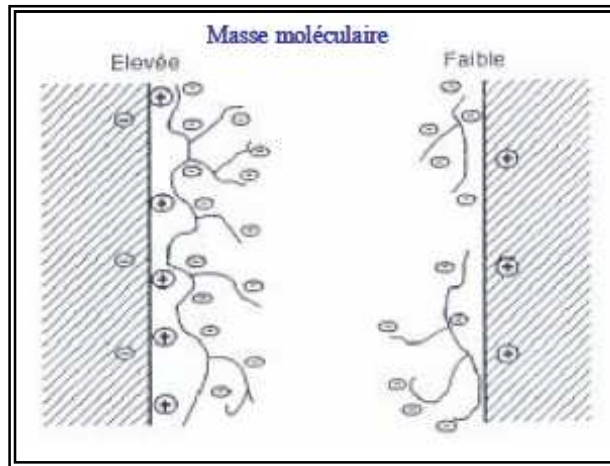


Figure 2.10: Illustration schématique de la répulsion électrostatique entre deux particules selon Jolicoeur & al [45]

L'adsorption de polymères chargés négativement se fait par l'intermédiaire d'ions bivalents Ca_2^+ . La quantité de polymères adsorbés est d'autant plus grande que la masse moléculaire du polymère est élevée et qu'il y'a plus d'ions Ca_2^+ dans la solution interstitielle.

Elle crée une charge négative à la surface des particules qui se repoussent (figure 2.10). Cet effet ne dépend pas de la masse moléculaire du polymère, sauf dans le cas des très faibles masses moléculaires.

2.3.4. Influence du dosage en superplastifiant

Pour augmenter la maniabilité d'un béton, le dosage normal des superplastifiants est compris entre 1 et 3 litres par mètre cube de béton, pour des superplastifiants sous forme liquide contenant 40 % de matériaux actifs. Lorsque les superplastifiants sont utilisés pour réduire la teneur en eau du béton, leur dosage est beaucoup plus élevé et se situe entre 5 et 20 litres par mètre cube de béton.

Dans le cas de rapport eau/ciment très faible (BHP), pour obtenir l'affaissement désiré, il est nécessaire de rajouter une quantité de superplastifiant. Dans ce cas, on procède par une double introduction en introduisant une première quantité de superplastifiant juste nécessaire pour obtenir un béton d'affaissement de 50 à 100 mm qu'on peut malaxer convenablement et on introduit le reste à la fin du malaxage.

Lorsque l'on utilise des superplastifiants à très forts dosages, Aïtcin a montré que leur effet enveloppant peut retarder quelque peu l'hydratation des grains de ciment quelque soit la nature du superplastifiant, le type de ciment ou la dimension moyenne de ses grains. [45]

Kadri [45] a montré en étudiant l'ouvrabilité des bétons à hautes performances, que la composition chimique du ciment et en particulier la teneur en C_3A , joue un rôle majeur sur la consistance du béton en absorbant les molécules de superplastifiants (figure 2.11).

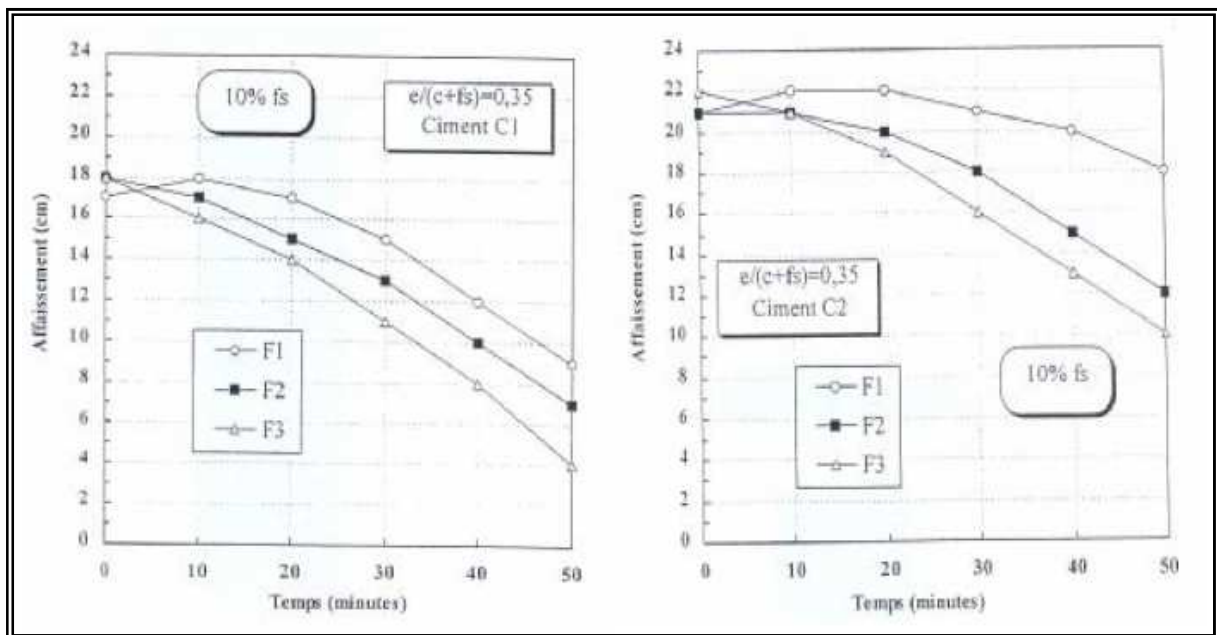


Figure 2.11 : Evolution de l'affaissement d'un BHP à base de deux types de ciment en fonction du temps pour 3 superplastifiants différents, selon kadri [45]

Ou

C1 : CPA-CEM I 52.5. **C2** : CPA-CEM I 52.5 PM CP2, faible teneur en C_3A

F1 : Superplastifiant à base de Naphtalène sulfonate.

F2 : Superplastifiant à base de résine mélamine.

F3 : Superplastifiant à base de résine vinyle.

En effet, les ciments à faible teneur en C_3A ont un effet favorable sur la diminution du dosage de saturation et sur la perte d'ouvrabilité au cours du temps. D'autre part, il a montré que parmi les 3 superplastifiants considérés, le naphtalène sulfonaté était supérieur en terme de dosage de saturation et maintien de la consistance du BHP au cours du temps.

Ismail Aiad [45] a montré en étudiant l'influence du temps d'introduction des superplastifiants sur les propriétés rhéologique des pâtes de ciment à l'état frais, que les superplastifiants à base de naphtalène et de mélamine augmentent les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment à court et long termes et que la réduction de la contrainte d'écoulement et la viscosité plastique dépend de la composition du ciment et du temps d'introduction du superplastifiant dont le temps optimal était de 10 à 15 min après le début du malaxage (figure 2.12).

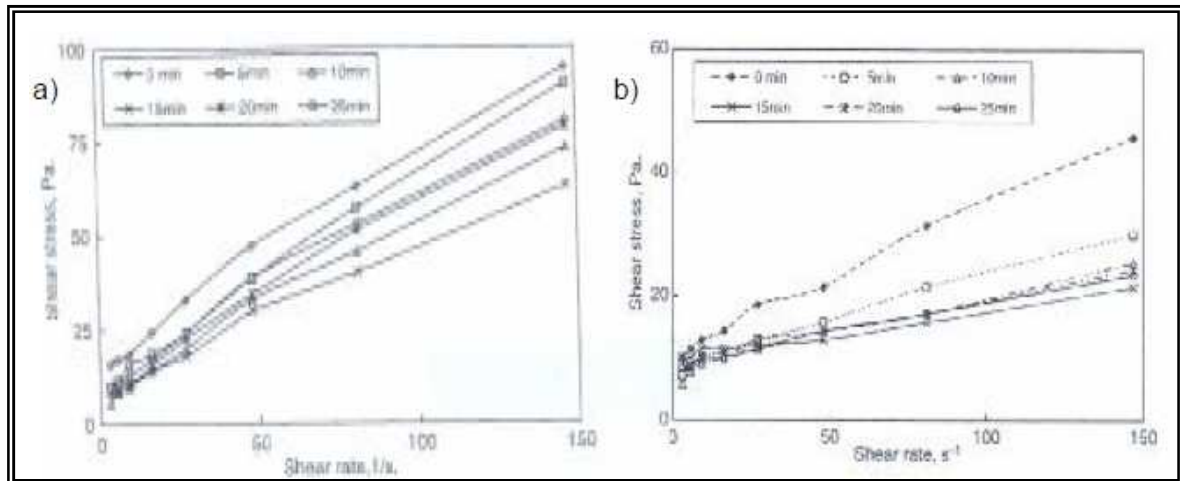


Figure 2.12: Relation contrainte de cisaillement – rapport de cisaillement des pâtes de ciment avec 1 % de superplastifiant MFS (a) et NFS (b), à différents temps d'introduction, selon Aiad [45]

MFS : Superplastifiant à base de mélamine formaldéhyde condensé.

NFS : Superplastifiant à base de naphthalène formaldéhyde sulfonate.

2.4. AJOUTS MINÉRAUX

Un ajout minéral est défini par la norme européenne EN 206-1 comme étant :

Un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les ajouts minéraux sont des produits ultrafins composés de particules de très faibles dimensions qui, ajoutés au ciment, améliorent notablement les performances du béton grâce à leurs propriétés physiques et chimiques. L'effet de l'ajout sur le béton parvient de l'amélioration de la structure de la matrice. Le dosage en ajouts minéraux varie suivant le type de produit, par exemple les cendres volantes et les laitiers du haut fourneau peuvent être introduit dans le béton à raison de 10% à 30% pour les cendres volantes et à 70% pour les laitiers du haut fourneau ; afin de remplir convenablement leurs fonctions. Mais dans le cas de la fumée de silice, qui est d'un côté coûteuse et d'un autre côté difficile à manipuler, il est recommandé d'utiliser des pourcentages variant de 5 à 15% par rapport au poids du

2.4.1. Fumée de silice

La fumée de silice est un sous produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou d'autres alliages de silicium ou de zircon. Elle est essentiellement composée de silice vitreuse, la teneur en SiO₂ varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée, plus la teneur en SiO₂ de la fumée de silice est élevée.

La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, une valeur usuelle pour la silice vitreuse, mais elle est un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible. Elle est nettement moins dense que le ciment Portland dont la densité varie de 3 à 3.2. Les particules de fumée de silice sont extrêmement fines, elles se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre 0.1 µm

et 1 ou 2 μm , de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment moyen. Ces particules sont tellement fines que leur surface spécifique ne peut être déterminée en utilisant la méthode Blaine. Elle doit être déterminée par adsorption d'azote (méthode BET). Les valeurs typiques que l'on retrouve dans la documentation sont comprises entre 13 000 et 25 000 m^2/kg . [46]

2.4.2. Obtention d'un BHP a base de la fumée de silice

L'obtention d'un béton à hautes performances ne nécessite pas forcément l'utilisation d'une fumée de silice ; puisque, on a pu fabriquer un béton dont sa résistance a atteint 60 MPa sans l'utilisation de fumée de silice. [4]

Les bétons à hautes performances de classe I et II (résistance en compression comprise entre 50 et 100 MPa) peuvent être fabriquer sans l'incorporation de la fumée de silice dans le mélange, mais pour des classes supérieures III, IV et V (résistance en compression dépassant 100 MPa) l'utilisation de la fumée de silice s'avère indispensable. [3]

L'utilisation des fumées de silice dans le but d'obtenir des résistances élevées doit donc se faire en les associant avec des CPA-CEM I sans dépasser le rapport FS/C = 18% ; même si l'effet granulaire de la fumée se fait sentir jusqu'à des valeurs de FS/C de l'ordre de 33%. Au-delà de ce pourcentage, les avantages espérés risquent d'être moindres voir même des difficultés de mise en œuvre. P-C. AÏTCIN [3] propose un dosage optimal compris entre 6 et 10%. Il faut signaler que l'utilisation de la fumée de silice nécessite obligatoirement l'ajout d'un superplastifiant [38], qui aura comme fonction la défloculation des grains de ciment et des particules de la fumée de silice. Sans superplastifiant, l'ajout de la fumée de silice au béton conduit pour une même maniabilité à une augmentation de la demande en eau. Car les ions de calcium Ca^{+2} , libérés lors de l'hydratation du ciment, ancrent les particules de fumée de silice entre elles et forment une structure rigide s'apparentant à un gel ; cette structure diminue fortement la maniabilité du béton.

2.4.3. Mode d'action de la fumée de silice dans le BHP

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement aux deux fonctions suivantes :

2.4.3.1. Effet physique

Cet effet est connu aussi sous le nom d'effet filler ou encore effet granulaire, les particules de fumée de silice sont 50 à 100 fois plus fines que le ciment et agissent en qualité de filler entre les grains de ciments eux même et les petits vides entre les grains fins du sable et du ciment. Ceci rend la structure de la matrice du béton plus homogène et beaucoup plus étanche ; il en résulte une meilleure compacité et une plus faible porosité. La diminution de la perméabilité à l'eau augmente la résistance contre le

gel/dégel et améliore la résistance contre les agressions chimiques (sulfates, chlorures, etc....).

Kwan [45] a montré en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que l'ouvrabilité d'un béton augmente avec le pourcentage de fumée de silice pour un rapport eau/liant constant (figure 2.13).

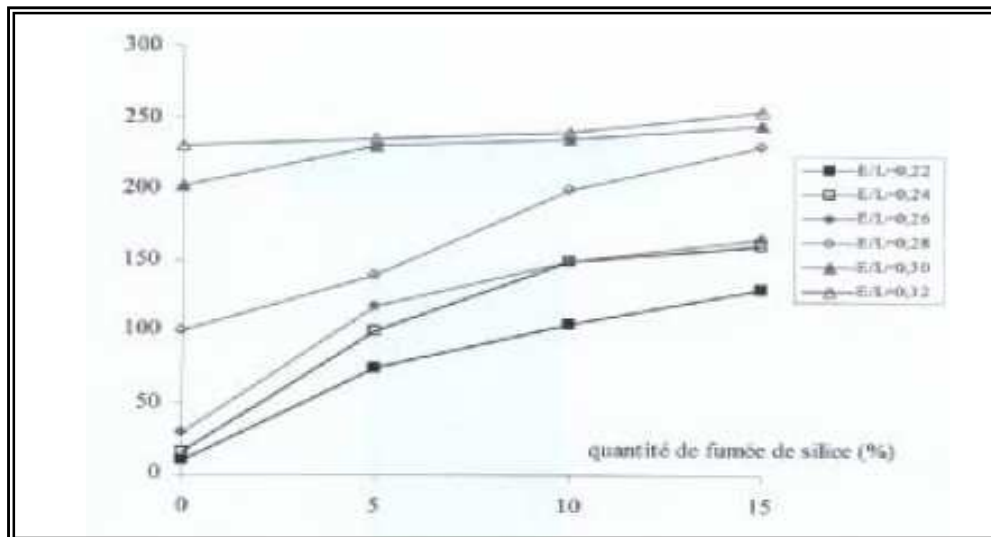


Figure 2.13: Variation de l'ouvrabilité d'un béton en fonction du pourcentage de fumée de silice pour différents rapports eau/liant selon Kwan [45]

De Larard & al [45] ont montré en étudiant l'amélioration des mortiers et bétons due réellement à la fumée de silice, que la maniabilité d'un mortier varie selon la quantité de fumée de silice incorporée (Figure 2.14).

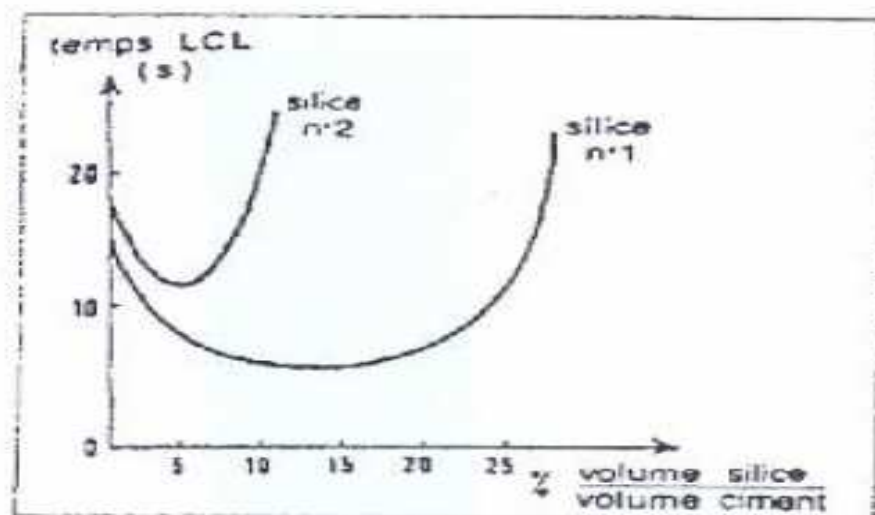


Figure 2.14: Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon De larrad & al [45]

4.3.2. Effet pouzzolanique

La fumée de silice est l'ajout pouzzolanique le plus réactif. Contrairement aux cendres volantes, elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ. [46] Les particules SiO_2 amorphes de la fumée de silice se précipitent sous forme de silicate de calcium hydraté (C-S-H) avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment. Ce qui se traduit par une forte augmentation de la résistance mécanique tant à jeune âge qu'à terme.

D'après M. N. OUDJIT [46], l'activité pouzzolanique (en terme de dissolution de la silice et de fixation de chaux) de la fumée de silice ne dépend pas uniquement de leur surface spécifique ou de leur teneur globale en silice (SiO_2), mais aussi, de la nature et la teneur des impuretés qu'elles renferment, et plus particulièrement, du carbone imbrûlé, qui, à forte quantité, provoque un important retard d'hydratation des constituants principaux du ciment Portland (C_3S , C_3A) et retarde considérablement le phénomène pouzzolanique.

La consommation d'hydroxyde de calcium lors de la réaction pouzzolanique conduit à une diminution du pH par rapport à un béton exempt de silice. C'est la raison pour la quelle, il convient dans le cas du béton armé de limiter la quantité maximale de la fumée de silice à 10% [3], par rapport au poids du ciment, afin de garantir la protection anticorrosion des armatures.

Appa Rao [45] a montré en étudiant le développement des résistances avec l'âge des mortiers contenant de la fumée de silice, que pour un rapport eau/liant constant égal à 0,5, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier (figure 2.15).

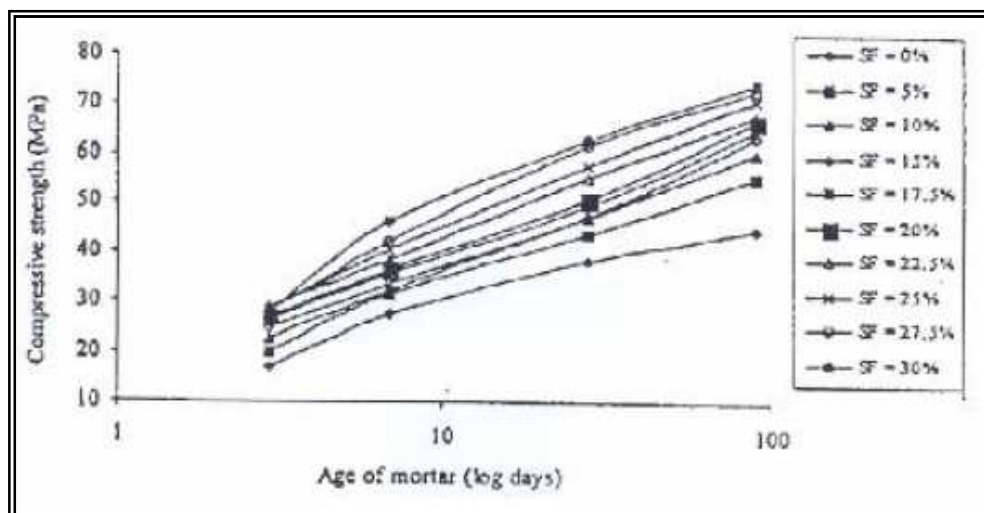


Figure 2.15: Variation des résistances en compression des mortier en fonction du temps d'hydratation pour différentes teneurs en fumée de silice pour $E/C=0,5$ selon Appe Rao [45]

Kwan [45] a également montré, en étudiant l'utilisation de la fumée de silice pour la fabrication des bétons de hautes résistances et auto-compactants, que quelque soit le rapport eau/liant, l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 15 % de substitution du ciment par l'addition, conduit à une augmentation des résistances en compression à 28 jours (figure 2.16).

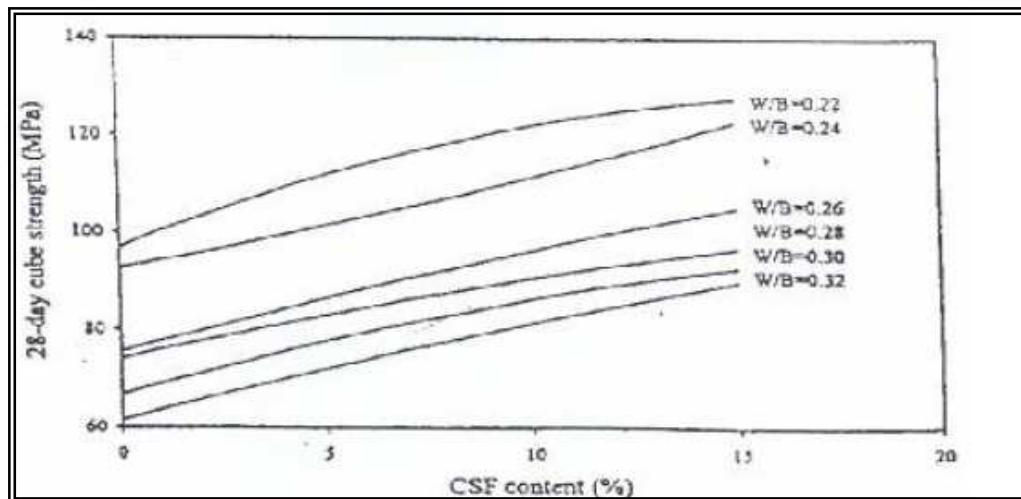


Figure 2.16: Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon Kwan [45]

2.4.4. Avantages de la fumée de silice

L'introduction de la fumée de silice dans le béton présente un nombreux avantage.

Elles réduisent considérablement les phénomènes de ressuage et de ségrégation et augmente aussi significativement la résistance en compression du béton entre 7 jours et 28 jours.

Certaines propriétés des bétons durcis, telle que la résistance au cycle de gel-dégel sont notablement amélioré, lors du malaxage les grains de la fumée de silice s'insèrent entre les grains de ciment et diminuer ainsi le dosage en eau, de plus, elles sont reconnue comme étant un produit efficace entre les réactions alcalis-silice. Par contre les difficultés rencontrées lors de la manipulation et le transport des fumées de silice constituent un inconvénient majeur. A cause du fait de la petite taille des grains, ceux ci ont tendance à former une structure très lâche sous l'action d'attraction électrostatique. [47]

2.5. FIBRES METALLIQUES

La recherche et la conception du béton renforcer de fibre en acier a commencé à augmente dans l'importance dans les années 70, et depuis ces jours divers types de fibres en acier ont été développés. Ils sont différent en matériel aussi bien que dans la taille, forme et structure extérieure. En raison de la fabrication différente, les processus et les différents matériaux, sont des différences dans les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, catégorie d'ancrage mécanique et possibilités de distribution et d'absorption d'effort. Le rôle de ces fibres pour le renforcement des bétons vient du fait

que l'acier a une bonne compatibilité avec le béton. De plus, le module d'élasticité de l'acier qui est environ sept fois plus élevé que celui du béton permet d'améliorer la ductilité du béton en mobilisant des efforts de traction dans ces fibres dès la fissuration. Ces fibres trouvent beaucoup d'applications réelles et potentielles dans le domaine du génie civil. Les fibres d'acier de forme ronde sont produites en coupant le fil de fer ayant des diamètres variant entre 0.2mm et 0.75mm.

Il existe aussi des fibres ayant des formes plates avec des sections variant entre 0.15mm et 0.40mm d'épaisseur et entre 0.25 mm et 0.90mm en largeur. Les types et formes de fibres d'aciers qui peuvent exister sont présentées en (Figure 2.17)

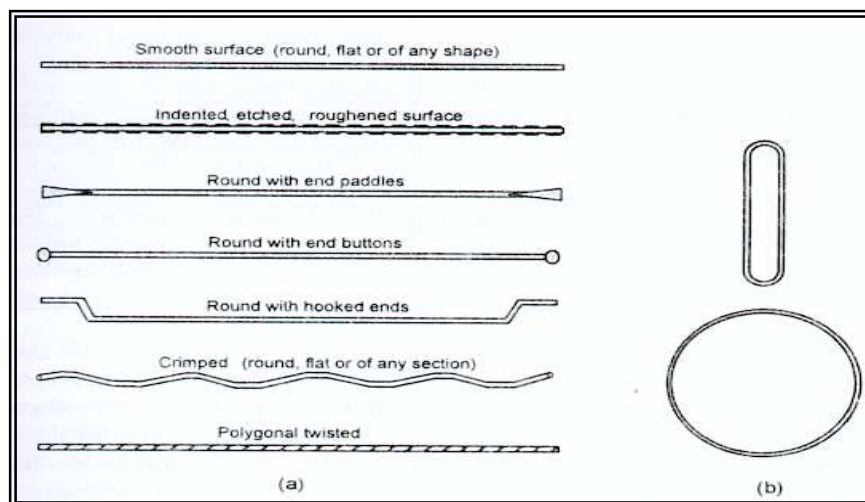


Figure 2.17: Types et formes de fibres d'aciers utilisées [18]

La rupture du béton fibré étant toujours par arrachement des fibres, l'utilisation des fibres de haute adhérence améliore la résistance à l'arrachement et par conséquent améliore les propriétés mécaniques du matériau composé. Les proportions d'un mélange normal en béton à base de fibres varient généralement entre 1 à 3% par volume bétonné ; les fibres ont des longueurs qui varient entre 20 et 60mm au maximum. L'élancement, défini comme étant le rapport longueur/diamètre (l/d), est un paramètre important dans le sens où il traduit les deux caractéristiques d'une fibres qui sont la longueur et le diamètre. Pour une efficacité optimale, ce paramètre doit varier entre 50 et 75. Les dosages élevés en fibres longues donneraient des performances mécaniques meilleures si les fibres pouvaient être distribuées uniformément.

Les problèmes de la maniabilité et de la distribution uniforme deviennent plus aigus avec l'augmentation du % et de la longueur des fibres. L'amélioration de la résistance à la flexion avec l'utilisation des fibres d'acier varie de moins de deux fois pendant que les résistances à la fissuration excessive et à la ductilité peuvent être améliorées jusqu'à vingt fois. Les fibres d'acier trouvent leur application dans les bétons de dallage industriels et les bétons autoplaçants, dans les pistes d'aérodrome, dans les dalles de compression pour planchers, dans les bétons projetés des tunnels et des talus, dans les bétons préfabriqués pour les panneaux de façadesetc. [17]

2.6. EAU DE GACHAGE

L'eau est indispensable à la fabrication du béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Les relations entre le béton et l'eau sont très intimes. Quand on mélange l'eau au ciment, une partie de celle-ci va se transformer chimiquement et se lier avec d'autres composants pour former des cristaux. À l'origine de la solidification, la pâte de ciment ainsi formée est utilisée comme une colle qui va permettre la cohésion du mélange gravier et grains de sable. L'eau en excès restant après l'hydratation du ciment va disparaître progressivement dans les jours, les mois et parfois les années qui suivront. Durant tout ce temps, elle va intervenir dans d'autres processus nettement moins bénéfiques pour le matériau.

L'eau apportée en excès à la fabrication est également nocive, en disparaissant, elle laisse place à des interstices, des vides, qui augmentent la porosité du matériau, et diminuent sa résistance. En s'échappant progressivement, elle va aussi diminuer le volume occupé par le béton et provoquer sa contraction. La tendance actuelle dans les bétons à hautes performances tend vers la diminution de cet excès d'eau. Il est cependant inévitable de mettre plus d'eau que nécessaire pour l'hydratation du ciment car elle participe aussi à la consistance : elle assure la fluidité nécessaire au coulage. Une solution efficace consiste à ajouter des agents fluidifiants qui permettront ainsi d'éviter l'excès d'eau. De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints.

CHAPITRE 3

ETUDE

EXPERIMENTALE

3. ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. GENERALITES

Dans cette partie, nous abordons les différents essais effectués pour la formulation du béton à hautes performances et du béton à haute performance fibré, ainsi que les essais réalisés sur le béton confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état frais et durci.

Les matières premières utilisées sont d'origine locale et étrangère, et qui sont respectivement :

- Des granulats concassés provenant de la carrière de la société Algérienne des Granulats (ALGRAN) sise à Oued Fodda (Chlef), sont de forme irrégulière. Leurs dimensions sont 3/8, 8/14,
- Du sable roulé de rivière d'Oued Chlef de dimension 0/4,
- Ciment Portland Composé CPJ CEM II/A 42.5 produit de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef),
- Une fumée de silice fabriquée par la société canadienne SKW, commercialisé par la société "SIKA",
- Un adjuvant superplastifiant "SIKA VISCOCRETE TEMPO 12" commercialisé par la société "SIKA",
- Les fibres métalliques commercialisées par la société Sika sous le nom de Dramix (METAL FIBRES VISCOCHAPE).

La confection du béton et tous les essais ont été réalisés au sein De Laboratoire De Génie Civil – Université Hassiba Ben Bouali Chlef. Les essais ont été faits suivant les normes ASTM.

3.2. METHODES D'ESSAIS

3.2.1. Essais sur granulats

3.2.1.1. Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650)

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. L'analyse granulométrique est une opération qui nous permet d'identifier un matériau. Les masses des différents refus ou celles des différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

L'analyse granulométrique permet aussi, de déterminer la grosseur minimale «d» et la grosseur maximale «D» des matériaux entrant dans la composition du béton. La connaissance de la grosseur de grains de granulats dans la composition du béton, est nécessaire, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux

utilisés pour l'analyse.

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$. M est exprimé en kilogrammes et D est la plus grande dimension spécifiée en millimètres. L'opérateur ou l'utilisateur doit vérifier si les matériaux utilisés sont bien conformes aux spécifications et aux normes en vigueur.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

3.2.1.1.1. Matériel pour l'analyse granulométrique

- Une balance de 30000 g,
- Un appareil pour sécher les matériaux (étuve),
- Une série de tamis ou passoires,
- Echantillonneur.



Figure 3.1: Matériels pour l'analyse granulométrique

3.2.1.1.2. Description de la méthode

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme roulée et leur diamètre est de 0/3, 3/8, 8/14. Une fois ces matériaux lavés, ils seront ensuite séchés pendant 72 heures à l'étuve à une température maximale de 105°C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose du fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériaux pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériaux passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériaux retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide du tamiseur électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 , la masse de ce refus du tamis immédiatement inférieur est pesée avec le refus précédent. Soit R_2 , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulé. R_n , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

3.2.1.2. Essai d'équivalent de sable (NF P 18-597)

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculante ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment + flocculant (h_1) et du sédiment (h_2).

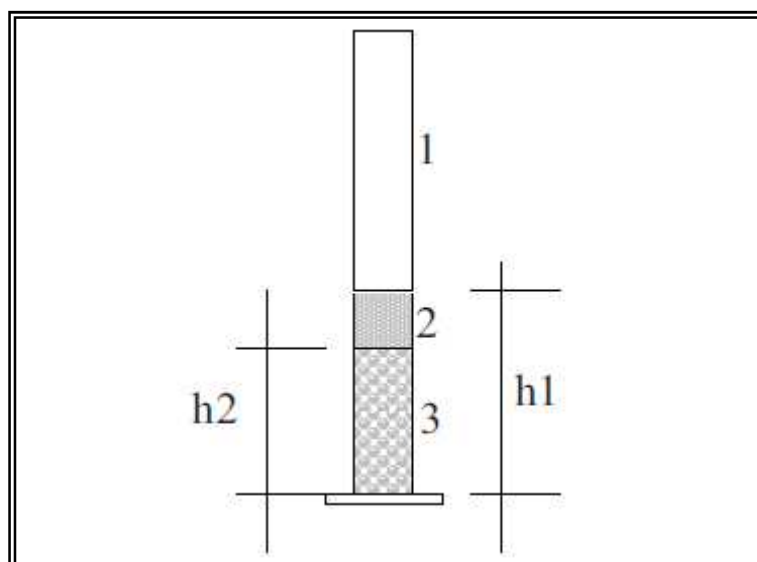


Figure 3.2: Essais d'équivalent de sable

1. Eau claire.
2. Flocculat (eau trouble)
3. Sable.

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante:

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \dots \dots \dots (3.1)$$

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable, la présence d'un excès d'argile peut provoquer une augmentation du retrait et une forte demande en eau ce qui entraînera une baisse de résistance mécanique, cependant un manque total de fines conduit à des bétons peu maniabiles, ségrégables et de faibles compacité.

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible

Tableau 3.1: Propreté des sables

ES	Commentaire
ES < 60	Sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour les bétons de qualité.
65 ≤ ES < 75	Sable légèrement argileux, de propreté admissible pour les bétons de qualité courante, à moins de craindre particulièrement le retrait.
75 ≤ ES < 85	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité, valeur optimale à vue 75.
ES > 85	Sable propre l'absence presque totale des fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton, qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

3.2.1.2.1. Equipement pour équivalent de sable

- Eprouvette cylindrique en plastique portant deux repères (un repère inférieur et un repère supérieur),
- Récipients pour mesure de l'échantillon à tester,
- Tamis de 4 mm d'ouverture,
- Récipient de 10 litres pour contenir la solution lavant, muni d'un tuyau et pipettes de lavage,
- Bouchon en caoutchouc,
- Règle métallique graduée,
- Entonnoir,

- Agitateur électrique,
- Piston muni d'un contre poids.



Figure 3.3: Matériel pour l'essai équivalent de sable

3.2.1.2.2. Mode opératoire

- On remplit l'éprouvette de solution lavant jusqu'au trait inférieur,
- A l'aide du récipient de mesure, on introduit une masse sèche de 120 g de matériau dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air,
- On laisse pendant dix minutes. Ensuite on agite l'éprouvette à l'aide de l'agitateur électrique afin de boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc à raison de 90 cycles en 30 s,
- Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur,
- Laisser reposer pendant 20 minutes,
- mesure à l'aide réglé la hauteur h_1 (sable + flocculat), et a l'aide de piston la hauteur h_2 (sable).

Cadence des essais : au nombre de 2.

3.2.1.3. Module de finesse (NF P 18-304)

Le module de finesse d'un sable est égal au 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage, sur les tamis de la série suivante : 0.160 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.50 – 5.

Le calcul du module de finesse, est plus souvent utilisé pour les sables, c'est une caractéristique importante dans le proportionnement du béton.

Le module de finesse des sables utilisables se présente comme suit ;

A..... de 2.20 à 2.80 sables préférentiels.

B..... de 1.80 à 2.20 sables un peu trop fins.

C..... de 2.80 à 3.20 sables un peu trop grossiers

Un sable grossier ($2.8 < M_f < 3.2$) favorise l'obtention d'une bonne résistance mais risque d'entraîner

une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation, quant au sable fin ($1.8 < M_f < 2.2$) il facilite la mise en œuvre du béton au détriment de la résistance.

Pour un béton à hautes performances, vu l'importante quantité de fines (ciment et ajout minérale), il est préférable d'utiliser un sable dont son module de finesse est compris entre 2.7 et 3.0.

3.2.1.4. Masse volumique

Pour étudier la formulation d'un béton, il est plus évident de travailler avec les quantités de composants d'après leur masse plutôt qu'avec leur volume.

Donc il est indispensable de connaître la masse volumique absolue du gravier pour pouvoir convertir les volumes (l) obtenus en masses (kg).

La masse volumique absolue correspond à la masse de matière pleine excluant tous vides à l'intérieur des grains.

3.2.1.5. Essai Los Angeles (NF P 18-573)

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

3.2.1.5.1. Principe de l'essai

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments passant à travers un tamis de 1.6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans la machine « Los Angeles », le matériau testé appartient à la classe granulaire 10/14 mm dans ce cas le nombre de boulets est 11, soit environ une masse totale des boulets égale à 4840 g

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$100 \cdot \frac{m}{M} \dots\dots\dots (3.2)$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau. (L_A)

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.



Figure 3.4: Appareil Los Angeles

3.2.1.5.2. Mode opératoire

- Tamisage de l'échantillon à sec.
- Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante.
- La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g.
- Introduction avec précaution la charge de boulets correspondant de la classe granulaire choisie au nombre de 11, puis l'échantillon pour l'essai.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn)
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm.
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante, pesé ce refus une fois séché, soit, m' le résultat de la pesée.

Où :

$$m = 5000 - m' \dots\dots\dots (3.3)$$

3.2.2. Essais sur béton frais

3.2.2.1. Mesure de l'affaissement (NF P 18-415)

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test), qui est l'essai le plus utilisé à cause de sa facilité et sa reproductible sur chantier.



Figure 3.5: Cône d'Abrams

Cet essai est utilisé pour contrôler le pourcentage d'eau dans le béton confectionné. Il consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre après le soulèvement du cône d'Abrams verticalement. On prend la moyenne de trois essais successifs.

3.2.2.1.1. Matériel

- Cône de 20/10/30 cm,
- Embase métallique,
- Portique,
- Tige de piquage de 16 mm de diamètre,
- Entonnoir de remplissage,
- Règle métallique graduée,
- Règle à araser.

3.2.2.1.2. Mode opératoire

Humidifier la surface d'appuis et y assujettir le moule dont la paroi intérieure, bien propre, aura été légèrement huilée.

L'introduction de béton dans le moule se fait en trois couches au moyen d'une pelle creuse, chacune ayant une hauteur égale au tiers de la hauteur du cône. Cette introduction doit commencer une à deux minutes, au maximum, après prélèvement du béton destiné à l'essai. On arase, on soulève ensuite le moule conique avec précaution et on mesure l'affaissement au moyen de la règle graduée.

3.2.3. Essais mécaniques

Pour chaque type et âge d'essai, les éprouvettes testées sont au nombre de deux.

3.2.3.1. Essais destructifs

3.2.3.1.1. Essai de compression (NF P 18-455)

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de différentes dimensions ou sur des cubes.

Pour nos essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques (10 × 10 × 10) cm, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(3.4)$$

Avec :

σ_c : Contrainte de rupture (MPa)

P : Charge de rupture (N)

S : Section de l'éprouvette (mm²)



Figure 3.6: Machine d'essai de compression

3.2.3.1.1.1. Mode opératoire

- 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,
- Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai,

- Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage,
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur,
- Sélectionner une vitesse constante de chargement 5 KN/s,
- Application de la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante,
- La charge maximale obtenue doit être enregistrée..

3.2.3.1.1.2. Appareil utilisé

Presse hydraulique se composant de :

- cadran de mesure (portée 2000 KN),
- régulateur de vitesse,
- Manette d'admission d'huile.

3.2.3.1.2. Essai de traction par fendage (NF P 18-408)

Cet essai, appelé aussi essai Brésilien, consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse, cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices.

L'essai a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16 × 32) cm à l'aide de la même presse de l'essai de compression.

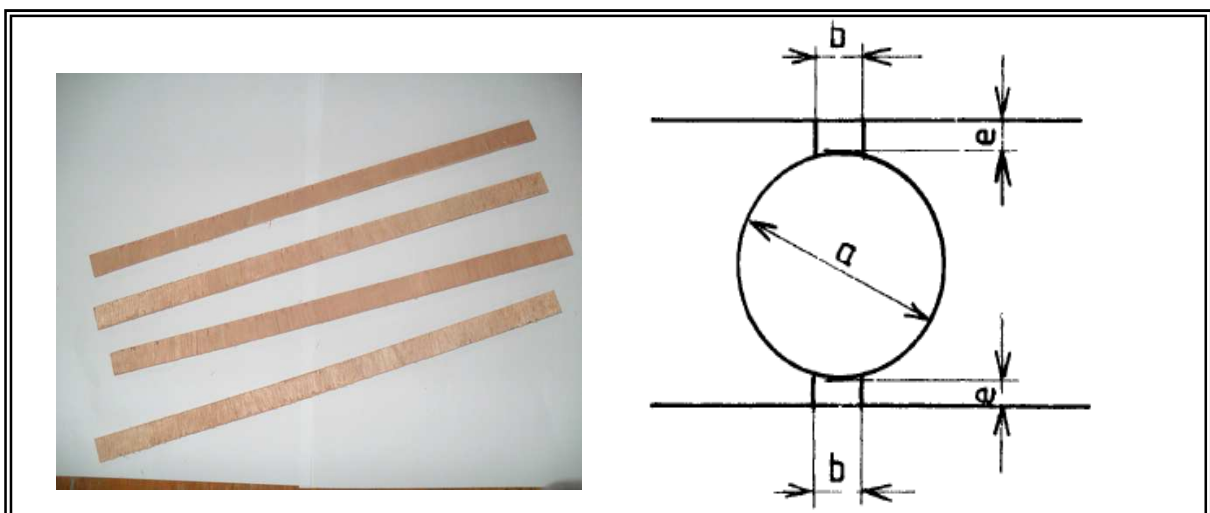


Figure 3.7: Bande de chargement



Figure 3.8: Essai de fendage

Bandes utilisées une seul fois en contreplaqué neuf ayant les dimensions suivantes (en millimètres):

$$b = (0,09 \pm 0,01).a \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$a = 4 \pm 1$$

$l \geq$ Longueur de l'éprouvette

La résistance à la traction f_t est définie par la relation suivante :

$$f_t = \frac{2.F}{\pi.a.h} \dots\dots\dots (3.6)$$

Avec :

F : La charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétral vertical ;

a : Le diamètre du cylindre ;

L : La longueur du cylindre.

3.2.3.1.2.1. Mode opératoire

- Placement et centrage de l'éprouvette et les bondes de chargement entre les plateaux de la presse,
- L'application la charge d'une manière continue et sans chocs,
- La vitesse de chargement doit être constante pendant la duré de l'essai. Pour un cylindre de 16 cm de diamètre la vitesse est **4 KN/s**.

3.2.3.1.2.2. Appareil utilisé

Presse hydraulique se composant de :

- cadrant de mesure (portée 2000KN),
- régulateur de vitesse,
- Manette d'admission d'huile,

3.2.3.1.3. Essai de traction par flexion (NF P 18-407)

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm. Pour mesurer la résistance en traction par flexion on utilisera la méthode de 3 points (flexion trois point).



Figure 3.9: Machine d'essai de flexion



Figure 3.10: Essai de flexion

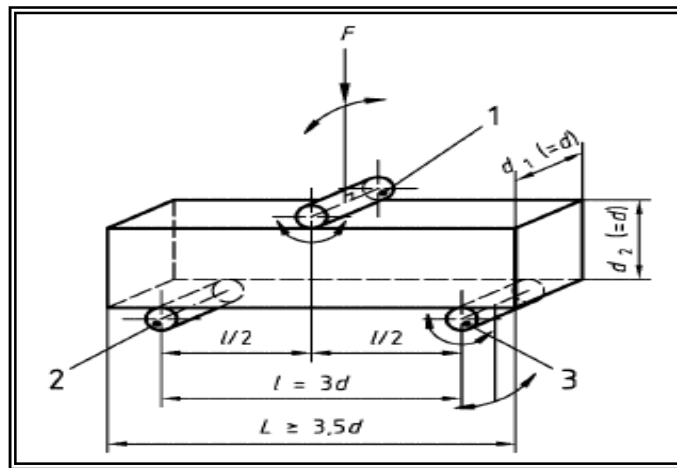


Figure 3.11: Essai de flexion

La résistance en flexion est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{fl} = \frac{3.F.l}{2.d^3} = \frac{9.F}{2.d^2} = \frac{4,5.F}{d^2} \dots\dots\dots(3.7)$$

où :

- σ_{fl} : la résistance en flexion, en mégapascals (newtons par millimètre carré) ;
- F** : la charge maximale, en newtons ;
- l** : l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;
- d** : est la dimension de la section transversale de l'éprouvette, en millimètre.

La formule ci-dessus suppose que le matériau a un comportement élastique linéaire. Aussi certains auteurs proposent un coefficient correcteur de 0,6 pour obtenir la contrainte de traction pure.

$$\sigma_{fl} = \frac{2,7.F}{d^2} \dots\dots\dots(3.8)$$

3.2.3.1.3.1. Mode opératoire

- L'appareil de chargement doit comporter un rouleau de chargement centré par rapport aux rouleaux inférieurs, comme l'indique la Figure 3.10,
- Les éprouvettes sont tout d'abord retirées de leur conservation, et séchées pendant une heure à l'air,
- l'éprouvette étant placée sur deux points d'appuis distant de 21 cm « 3a » et chargée en son milieu par une charge concentrée « F » jusqu'à rupture, avec une vitesse de chargement constante.

3.2.3.1.3.2. Appareil utilisé

L'appareil ayant servi pour l'essai de traction par flexion, se compose de :

- Un cadran sur lequel figurent 2 échelles de charge (50 et 200 KN),
- Régulateur de vitesse,
- Manette d'admission d'huile hydraulique.

3.2.3.2. Essais non destructifs

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants: les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendant également de leurs dimensions et leurs formes.

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. C'est méthodes sont basées sur le fait que certaine propriétés physiques du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton comprennent la dureté (capacité de rebondissement), la capacité de transmettre les ultrasons.

3.2.3.2.1. Essais sclérométriques (NF P.18-417)

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton et il existe une corrélation empirique entre la résistance et l'indice sclérométriques. Des études réalisées au LCPC ont montré que la corrélation peut prendre la forme: $R_C = a.I_s^2 + b.I_s + C$. Le scléromètre convient aux essais en laboratoire comme aux essais sur chantier.

Une masse commandée par un ressort se déplace sur un plongeur dans un tube de protection. La masse est projetée contre la surface de béton par le ressort, et l'indice sclérométriques est mesuré sur une échelle. La surface sur laquelle l'essai est effectué peut être horizontale, verticale ou à tout autre angle, mais la corrélation devra prendre en compte l'inclinaison de l'appareil par rapport à cette surface.

Le scléromètre est une méthode peu coûteuse, simple et rapide pour connaître la résistance du béton.

Les résultats sont influencés par des facteurs tels que la régularité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et le plus gros granulats.

Pour chaque essai au scléromètre, une série de douze lectures sont prise sur deux génératrice des éprouvettes prismatiques (10×10×10) douze points distincts, la distants ente eux de 2,5 mm. Les éprouvettes sont maintenues entre les plateaux d'une presse sous une contrainte de **0,5 MPa**. Le scléromètre étant placé perpendiculairement à l'axe de l'éprouvette.



Figure 3.12: Scléromètre

Règles à observer :

- Réglage régulier de l'appareil par étalonnage,
- Opérer avec un nombre de points mesure suffisant,
- Eliminer les valeurs aberrantes,
- Poncer la sur du béton à tester,
- Noter l'état d'humidité du béton,
- Se servir de l'appareil dans sa position horizontale,
- Bien noter les épaisseurs auscultées (phénomène de résiliation pour les faibles épaisseurs),
- Réalisation d'un étalonnage préalable de l'appareil avec le type de béton à réaliser.

3.2.3.2.2. Essai auscultation dynamique (ULTRASON) (NF P 18-418)

C'est un essai non destructif qui se fait par mesure de la vitesse du son, laquelle est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc, plus résistant.

Il consiste à mettre les deux sondes (émettrice et réceptrice) de l'ultrason entre les deux extrémités d'une éprouvette ($10 \times 10 \times 10$) cm entre deux point déterminer du béton.

C'est une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée aussi bien dans le cadre d'un suivi de production qu'en contrôle sur ouvrage. Une vitesse élevée de propagation indique généralement un béton de bonne qualité.

Tableau 3.2: Qualité du béton en fonction de la vitesse de propagation

Qualité	Vitesse de propagation m/s
Excellente	Supérieure à 4000
Bonne	3200 - 4000
Douteuse	2500 - 3200
Mauvaise	1700 - 2500
Très mauvaise	Inférieure à 1700

*Figure 3.13: Ultrason**Figure 3.14: Essai auscultation sonique*

À partir du temps de propagation des ondes soniques à travers la masse du béton, on calcule la vitesse de propagation des ondes à partir de la formule suivante :

$$V = \frac{L}{t} \cdot 10^6 \dots \dots \dots (3.9)$$

Avec :

V : La vitesse de propagation des ondes en (m/s)

L : La distance entre les deux sondes en m (pour l'éprouvette testée L = 0.1 m)

t : Le temps de propagation des ondes (μ s)

On admet que la connaissance de la vitesse du son permet de porter sur le béton une appréciation sur la résistance à la compression.

3.3. CRACTERISATION DES MATERIAUX

3.3.1. Matériaux utilise pour la confection des bétons utilises

Les matériaux mis en œuvre pour la fabrication des bétons avec et sans fibres ont les caractéristiques suivantes :

Les granulats ont fait l'objet d'une analyse granulométrique et les résultats sont consignés en (figure 3.15) suivante:

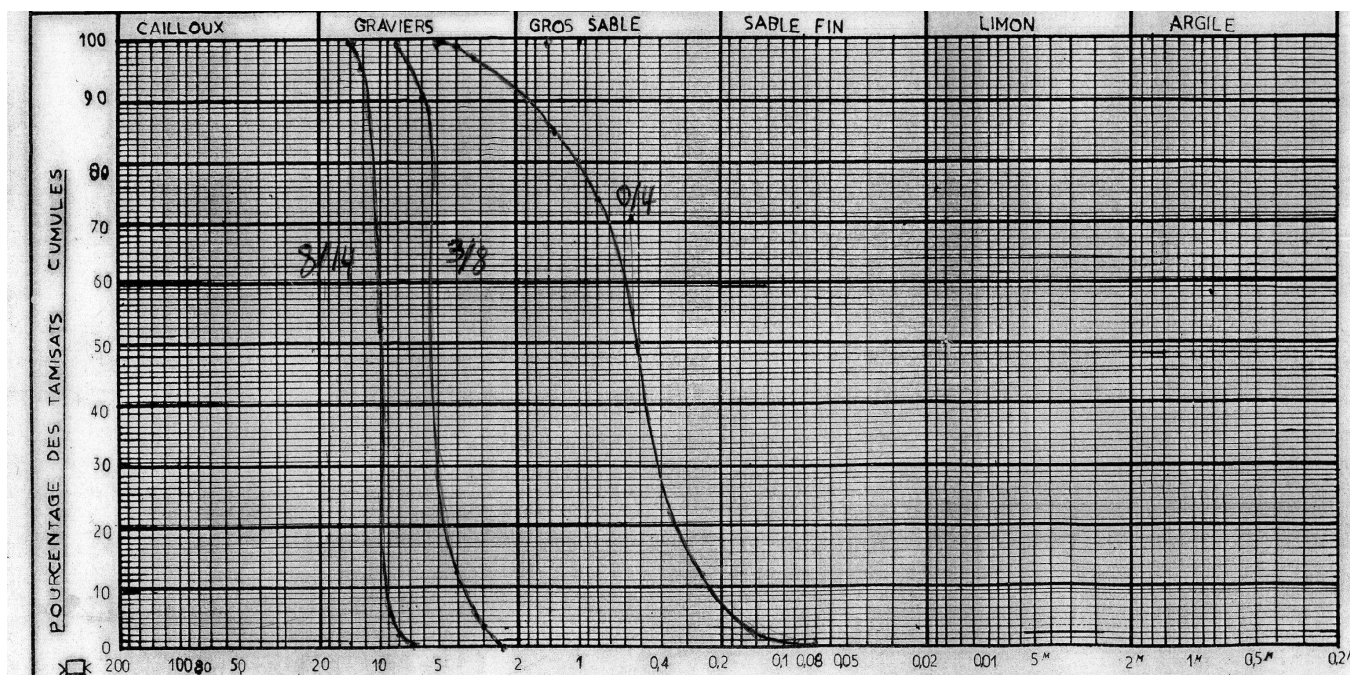


Figure 3.15: Courbe granulométrique des granulats utilisés

Les expérimentations ont été réalisées avec les granulats dont les propriétés sont données dans le (tableau 3.3) suivant :

Tableau 3.3 : Propriétés des granulats

	Sable 0/4	Gravillon 3/8	Gravier 8/14
Equivalent de sable (%)	92	/	/
Module de finesse (Mf)	2,37	/	/
Masse volumique	2,65	2,7	2,7
Coefficient L_A (%)	/	25	25

3.3.2. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un Ciment Portland Composé (CPJ CEM II/A 42.5) produit de la cimenterie d'Oued Sly (Chlef) dont l'ajout est le calcaire. La composition chimique et minéralogique du ciment utilisé est présentée dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Composition chimique du ciment de Chlef

Composition chimique (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
	22.60	4.20	3.55	62.17	2.19	0.63	0.42		1.84
Composition minéralogique (%)	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF		
	41.8		33.3		5.1		10.7		
SSB cm ² /g	3700								



Figure 3.16: Ciment de Chlef (CPJ CEM II/A 42.5)

3.3.3. Ajout minéral (fume de silice)

Les fumées de silice sont des poudres de silice extrêmement fines (inférieures à $1\mu\text{m}$), issues de l'industrie du silicium et de ses alliages rendues utilisables par densification ou suspension dans l'eau. Suivant la composition des alliages, des produits secondaires ajoutés aux ingrédients principaux et la méthode de fabrication, les propriétés des fumées de silice sont assez diverses. Elles sont riches en silice ($\text{SiO}_2 > 85\%$) et ayant une très grande finesse (surface spécifique entre 20 et $26\text{ m}^2/\text{g}$); elles fournissent de très bonnes propriétés aussi bien au niveau de la rhéologie en densifiant le matériau qu'au niveau des propriétés mécaniques et chimiques, tout en améliorant la durabilité du béton à long terme. L'effet pouzzolanique (hydratation) de la fumée de silice commence entre la première et la deuxième semaine après la fabrication du béton. La fumée de silice fabriquée par la société canadienne SKW, commercialisée par la société "SIKA". Les propriétés physico-chimiques de la fumée de silice sont données dans le tableau 3.5 suivant:



Figure 3.17: Fumée de silice (Sika S 95 DP)

Tableau 3.5: Données techniques de la fumée de silice

Densité apparente	$0,65 \pm 0,10$
Densité réelle (hélium)	2,24
Teneur en SiO_2	95% ($\geq 92\%$)
Teneur en Na_2O éq.	0,60% ($\leq 1,0\%$)
Teneur en SiC	1,50% ($\leq 3,0\%$)
Teneur en C libre	1,50% ($\leq 3,0\%$)
Teneur en S total	0,10% ($\leq 0,20\%$)
Surface spécifique BET (m^2/g)	23 (20 à 26)
Teneur en Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1,00% ($\leq 1,50\%$)
Teneur en Cl	0,06% ($\leq 0,20\%$)

3.3.4 Superplastifiants

Dans nos travaux, nous avons utilisé un superplastifiant commercialisé par la société "SIKA" sous le nom de "SIKA VISCOCRETE TEMPO 12". La plage d'utilisation recommandée est fixée par la fiche technique de 0,2 à 3% du poids du liant ou du ciment. Les caractéristiques physicochimiques de cet adjuvant données par le fabricant sont indiquées dans le (tableau3.6) suivant:



Figure 3.18: Superplastifiant (Sika viscocrete tempo 12)

Tableau 3.6: Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant Sika viscocrete tempo 12

Nature	liquide
Couleur	Brun-clair
Densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1%
Na₂O équivalent	≤ 1,0%
Extrait sec	30,2 ± 1,3%

3.3.5. Fibres métalliques


Les fibres utilisées sont des fibres métalliques fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé, commercialisées par la société Sika sous le nom de Dramix (METAL FIBRES VISCOCHAPE).

Elles comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux deux extrémités et sont accolées en plaquettes au moyen d'une colle à base d'acétate de polyvinyle, qui se dissout facilement au contact de l'eau, pour assurer leur répartition dans le béton. Les différentes propriétés des fibres sont résumées dans le (tableau3.7) suivant:



Figure 3.19: Fibres métalliques

Tableau 3. 7: Caractéristiques des fibres Dramix

Forme 	Longueur	Diamètre	Elancement	Résistance à la traction (MPa)	Nombre de fibres par kg
	L_f (mm)	D (mm)	L_f/d		
	30	0,55	55	1100	16750

3.3.6. Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet sans passer par l'analyse chimique.

3.4. CONFECTION DU BETON

En partant du principe qu'un béton est composé d'une phase fluide (la pâte) et d'une phase solide (granulat et sable), les performances du béton proviennent nécessairement de celle de sa pâte. Pour cela, les études de formulation se basent essentiellement sur la pâte et ses constituants. Pour la formulation de nos bétons, plusieurs gâchés a été effectué, plusieurs essais de mesures de l'affaissement au cône d'Abrams et des temps d'écoulement au cône de marsh ont été effectués sur des pâtes confectionnées par une combinaison des constituants.

Deux bétons ont été formulé dans notre programme noté BHP (béton a haute performance) et BHPFM (béton a haute performance avec ajout des fibres métalliques)

3.5. BETON A HAUTE PERFORMANCE ET BETON A HAUTE PERFORMANCE FIBRE

Le point critique de la formulation d'un BHP consiste à associer un liant et un superplastifiant afin d'obtenir un mélange fluide mais de faible teneur en eau, tout en permettant une mise en œuvre aisée

pendant un temps donné. Les principes importants à retenir pour la formulation des bétons à haute performance fibrés:

- Recherche d'une compacité optimale,
- Utilisation d'une quantité de fines plus importante, limiter le rapport $G/(G+S)$ à 0.5 et réduire la dimension maximale des granulats pour les bétons fibrés,
- L'élanement des fibres (L/d) est un paramètre de grande importance par son influence sur la maniabilité. Plus le rapport (L/d) est élevé, plus grand est le risque de formation d'enchevêtrements des fibres du à la chute de l'ouvrabilité du béton.

Deux types de bétons ont été confectionnés, un béton ordinaire BO de référence et un béton à hautes performances BHP. Il faut avant tout le concevoir et le fabriquer.

La formulation du béton ordinaire de référence a été établie à partir de la méthode de formulation de DREUX GORISSE [48]. La composition du béton ordinaire de référence est présentée dans le (tableau 3.8).

Tableau 3.8: Composition massique en Kg/m^3 pour le BO de référence

Matériaux	Ciment (Kg)	Sable 0/4 (Kg)	Gravier 3/8 (Kg)	Gravier 8/14 (Kg)	Eau (Kg)	Rapport E/L
BO de référence	380	710	240	890	209	0,55

Pour la formulation des BHP, il nous a fallu plusieurs essais (choix des ingrédients, dosage en ciment, squelette granulaire optimum, dosage optimum en superplastifiants) afin d'aboutir aux résistances et maniabilité désirées.

Cette méthode est une méthode expérimentale basée sur:

- L'optimisation du dosage des différentes classes de granulats et du sable,
- La correction de la composition par ajustements des dosages en superplastifiant et en ultrafine, afin de satisfaire, au maximum, une ouvrabilité acceptable et une meilleure résistance en compression.

3.6. OPTIMISATION DE LA COMPOSITION DU BHP

L'élaboration d'un béton à hautes performances nécessite, d'une part, l'accroissement de sa compacité et cela en combinant le mieux possible les différentes classes des granulats disponibles, et d'autre part

l'obtention d'une pâte liante suffisamment dense. L'utilisation conjointe d'ajout chimique et minérale permet cette densification.

3.7. ÉVOLUTION DE LA COMPATIBILITE LIANT/SUPERPLASTIFIANT

La difficulté majeure qu'on rencontre dans la formulation de béton à haute performance est de choisir le couple liant/superplastifiant le plus efficace qui permet d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité. En utilisant dans cette étude l'essai d'écoulement des types cône de marsh, il est basé sur la mesure du temps de l'écoulement d'un litre de coulis placé dans un cône menu d'un orifice dont le diamètre peut varier de 5 à 10 mm. La première mesure de la fluidité est faite à 5 minutes après le début du malaxage. Ensuite, on effectue une deuxième mesure de l'écoulement à 60 minutes. Cette méthode expérimentale a nécessité la réalisation de plusieurs gâchées successives. [1]



Figure 3.20: Matériels nécessaire pour l'essai cône de marsh

Les résultats finals illustrés sur (la figure 3.21), présentent le dosage de saturation et le temps d'écoulement de couple liant (ciment + 3% fumé de silice)/superplastifiant.

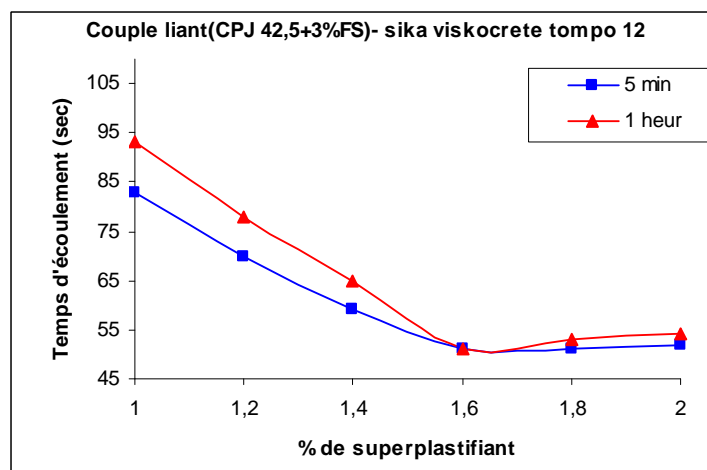


Figure 3.21 : Couple liant (CPJ42.5 +3% FS) – Sika viskocrete tompo 12.

Une fois le dosage en superplastifiant déterminée, on passe à la formulation finale du béton en prenant en considération la composition granulaire du BO de référence et les proportions des autres constituants (ciment, fumée de silice, adjuvant et eau).

Les données de base sont :

- Dosage en ciment 450 kg/m^3
- $E / L = 0,38 \rightarrow E = 171 . \ell$
- dosage de fumée de silice à 3 % par rapport au poids du ciment
- dosage du superplastifiant à 1,6 % par rapport au poids du ciment

Pour la formulation du BHPFM, les méthodes de composition des bétons de fibres métalliques si l'on regarde la littérature, on constate que ces méthodes, pour la plupart empirique, sont basées essentiellement sur un nombre d'études expérimentale aboutissent à des recommandations qui ne sont pas adaptées à toutes les utilisations que l'on fait des BHPFM et nous ne permettant pas de tirer le meilleur parti de ce composition.

Suivant l'application industrielle envisagée, la composition du BHPFM, doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé. Ainsi, suivant que l'on désire obtenir un BHPFM, avec une très bonne ouvrabilité, très résistant ou encore ayant une influence sur la ductilité des structure, la composition du matériau composite sera complètement différente.

Ainsi pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques de LCPC propose une méthode expérimentale basée sur la méthode Baron-Lesage, déjà utilisée pour les bétons courants.

La méthode de Baron-Lesage est basée sur deux hypothèses:

- pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C, fixé),
- le dosage optimal en granulats.

Alors on applique cette méthode pour le BHP témoin (sans fibres métalliques) afin que cette méthode soit applicable au béton de fibres métalliques on est amené à introduire une troisième hypothèse.

L'ajout des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

Dans la pratique, nous procédons en 3 étapes pour composer le BHPFM:

- nous nous fixons au départ le rapport E/C ainsi le pourcentage de fibres à incorporer,
- nous faisons varier le rapport S/G (Sable /Granulat) et nous déterminons pour chaque rapport l'ouvrabilité du béton de fibres.

Pour la composition de BHP témoin (sans fibres métalliques) on appliquant la méthode expérimentale basée sur la méthode de Baron-Lesage et on prend en considération le rapport S/G optimum.

Cette méthode expérimentale nous permettant que le squelette granulaire sera optimisé en faisant varier les proportions des fractions 0/4, 3/8, 8/14 plusieurs fois, et pour améliorer l'ouvrabilité on augmente le dosage du superplastifiant à chaque fois par rapport au poids de ciment où on cherche par

approximation successive, l'ensemble de ces proportions pour, lesquelles, on obtient simultanément, le meilleur affaissement au cône d'Abrams pour le béton frais, et la meilleure résistance en compression et un rapport S/G optimum qui nous facilite la formulation du BHPFM. Cette méthode nous permet, probablement, d'avoir une formulation locale, en fonction des matériaux et des conditions réelles de laboratoire.

Après une série de manipulations, on a abouti à une formulation finale pour le BHP témoin (sans fibres métallique) qui répondait tout à fait aux conditions d'exigence (bonne ouvrabilité et une résistance en compression adéquate). Ce qui est présenté dans le (tableau 3. 9)

Tableau 3.9: Composition massique finale en kg/m³ du BHP

Matériaux	Ciment (Kg)	Fumé de silice (Kg)	Sable 0/4 (Kg)	Gravier 3/8 (Kg)	Gravier 8/14 (Kg)	Eau (Kg)	Superplastifiant (kg)	Rapport E/L
BHP	436,5	13,5	680	270	750	163,5	10,8	0,38

Pour comparer les propriétés du béton à hautes performances à ceux d'un béton à haute performance avec ajout des fibres métalliques nous avons confectionné un béton à haute performance fibré, trois dosages en fibres métalliques sont utilisés (0.5%, 1% et 1,5%). Le rapport S/G a été gardé constant pour toutes les formulations (S/G= 0,66). Le dosage en superplastifiant devrait augmenter pour les bétons fibrés, la quantité de granulat est réduite pour permettre l'insertion des fibres. Les formulations sont données dans le (tableau 3.10).

Tableau 3.10: Compositions massiques (Kg/m³) des bétons utilisé

Matériaux	Ciment (Kg)	Fumée de silice (Kg)	Sable 0/4 (Kg)	Gravier 3/8 (Kg)	Gravier 8/14 (Kg)	Eau (Kg)	Superplastifiant (kg)	Dosage en fibre (Kg)
BO	380	0	710	240	890	209	0	0
BHP	436,5	13,5	680	270	750	163,5	10,8	0
BHPFM 0,5%	436,5	13,5	670	250	740	162,2	12,6	39
BHPFM 1%	436,5	13,5	660	250	730	162,2	12,6	78
BHPFM 1,5%	436,5	13,5	650	250	720	161,6	13,5	117

La caractérisation à l'état frais des bétons s'est faite au moyen de l'affaissement au cône et qui sont regroupées dans le (tableau 3.11) suivant:

Tableau 3.11: Propriétés à l'état frais des différentes formulations

Caractéristiques	Bétons				
	BO	BHP	BHP 0,5%	BHP 1%	BHP 1,5%
Rapport S/G	0,62	0,66	0,66	0,66	0,66
Affaissement (cm)	10,4	15,6	14,6	13,2	11

3.8. PROCEDURE DE FABRICATION DES EPROUVETTES

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire des matériaux de constructions (MDC) du département de génie civil à l'université de Chlef et les testes sont effectuées au laboratoire des matériaux de constructions (MDC) du département d'hydraulique. La fabrication des gâchées est effectuée dans un malaxeur à axe vertical de capacité 100 litres. Un mode opératoire strict et identique est suivi :

- Brassage à sec du mélange sable + Gravier + ciment + fumée de silice pendant 1mn,
- Ajout de l'eau + 1/3 du fluidifiant et brassage pendant 2mn,
- Ajout 2/3 de fluidifiant et malaxage pendant 2mn,
- Introduction des fibres pour les Bétons avec fibres pendant 15 secondes et malaxage pendant 1mn. Les fibres métalliques ont été dispersées à la main pour assuré une bonne répartition dans la masse du béton.



Figure 3.22: Malaxeur à béton

3.9. CONTROLE SUR LE BETON FRAIS

Nous nous intéressons ici au contrôle du béton frais, à sa sortie du malaxeur, en mesurant son Affaissement.



Figure 3.23: Affaissement au cône d'Abrams

3.10. CONFECTION DES EPROUVETTES

3.10.1. Type et tailles des moules

Les moules (figure 3.24), utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier de forme:

Cylindrique (16 x 32 cm)

Cubique (10x10x10 cm)

Prismatique (7x7x28 cm)



Figure 3.24: Moules utilisés

3.10.2. Remplissage des moules

Le remplissage des moules (cylindrique, cubique et prismatique) à été fait en deux couche conformément aux prescriptions de la norme ASTM. Après chaque couche les moules ont été vibrés à l'aide d'une aiguille vibrante. Dans le cas des bétons de fibres, une vibration interne est déconseillée pour éviter le phénomène de cheminements des fibres et formations de pelotes "effet d'oursins". Ainsi, le compactage a été fait au moyen d'une vibration externe par la table vibrante. L'opération de finition a été effectuée à l'aide d'une règle à araser comme il est mentionné dans les prescriptions de la norme ASTM.



Figure 3.25: Remplissage des moules

3.10.3. Conservation des éprouvettes

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau de chaux à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (figure 3.26).



Figure 3.26: Conservation des éprouvettes

CHAPITRE 4

RESULTATS

ET

INTERPRITATIONS

4. PRESENTATION DES RESULTATS

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au comportement mécanique (compression, traction par flexion et traction par fendage) du béton à haute performance (BHP) renforcé par des fibres métalliques, pour l'identification de l'influence du pourcentage des fibres métalliques sur la résistance des éprouvettes.

Les pourcentages des fibres utilisés pour la confection des éprouvettes testées en laboratoire sont les 0% de fibre (témoin), 0.5% de fibre, 1% et 1.5% de fibre.

Les résultats obtenus suites aux essais entrepris sont regroupés par la suite, sous formes de Tableaux et graphiques, selon l'âge, le type d'essai et le type de béton, afin de permettre la compréhension et l'exploitation des résultats dans la pratique.

4.1. RESISTANCES MECANIQUES

4.1.1. Résistance à la compression

Les essais de compression sont exécutés selon la norme **NF P 18-455** sur des éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont Béton Ordinaire (BO), le Béton à Haute Performance (BHP), le Béton à Haute Performance fibré à 0,5% (BHP à 0,5% de fibres métalliques), le Béton à Haute Performance fibré à 1% (BHP à 1% de fibres métalliques) et le Béton à Haute Performance fibré à 1,5% de fibres métalliques (BHP à 1,5% de fibres métalliques).

Les résultats des écrasements des éprouvettes durant la période de 28 jours sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1: Résultats des essais de compression des différents spécimens

ÂGE DU BÉTON (JOURS)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION (MPa)			
	7	14	21	28
BO	34	39,2	44	46
BHP témoin	65	71	75,6	78
BHPF (0,5%)	66	71,6	77	79
BHPF (1%)	67	73,8	79,6	81,4
BHPF (1,5%)	65	72	77,6	79,8

La résistance à la compression des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 28 jours sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.1).

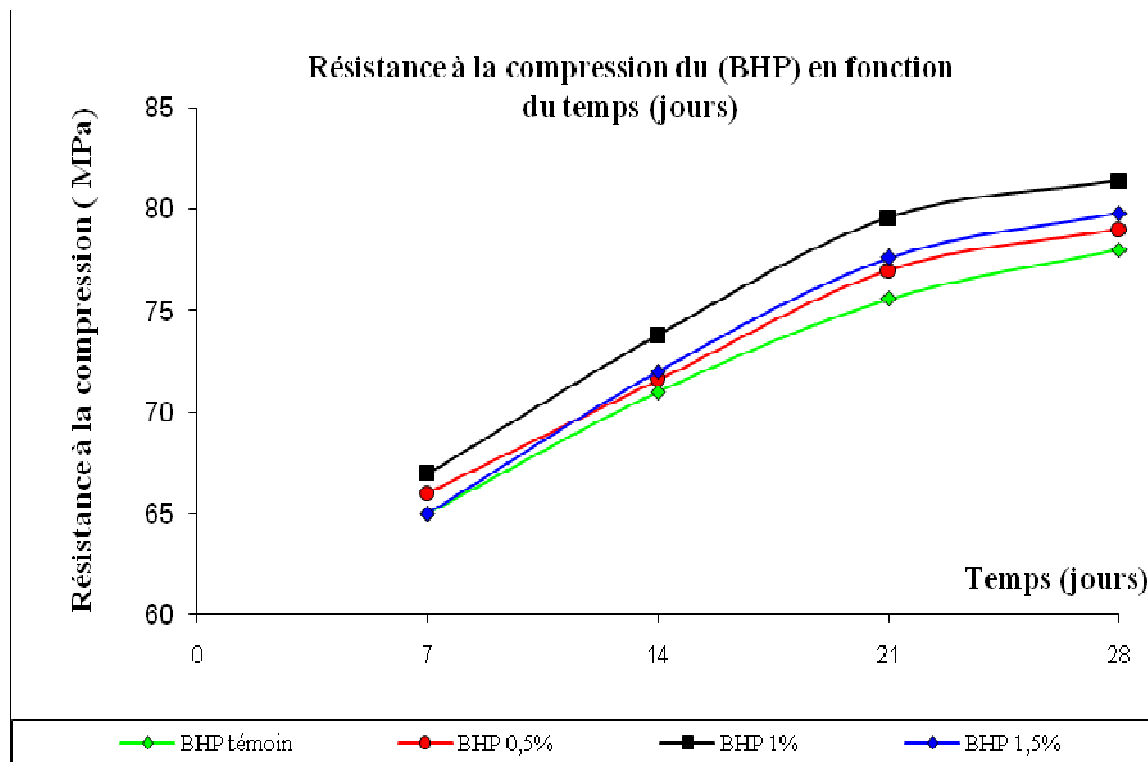


Figure 4.1: Résultats de l'évolution de la résistance en compression du BHP en fonction du temps (jours)

L'utilisation de la fumée de silice avec un superplastifiant est surtout utilisée pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances [1]. Cependant, quelques divergences subsistent entre les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet apporté par cet ajout (la fumée de silice). Certains chercheurs considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance en renforçant la liaison granulat/matrice de ciment. D'autres considèrent que la fumée de silice a surtout un effet bénéfique sur l'ouvrabilité du béton.

La technologie des adjuvants a fait beaucoup de progrès lorsque toute l'efficacité des propriétés dispersantes des polynaphthalènes et sulfonates a commencé à être utilisée, non seulement pour augmenter la fluidité du béton mais aussi pour diminuer le rapport eau/ciment (E/C), grâce à l'utilisation de ces polymères synthétiques. Il devint facile alors d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à 100 MPa sans aucun effet négatif sur la rhéologie du béton [1].

Les résultats des essais de la résistance à la compression obtenus sur le béton à haute performance (BHP) sont ceux trouvés généralement par la majorité des chercheurs qui ont travaillé sur ce type

de béton. L'utilisation de l'ajout minérale avec un E/C réduit et l'utilisation du superplastifiant augmentent la résistance à la compression du béton à haute performance (BHP) par rapport au béton de référence d'environ 60% à l'âge de 7 jours [31]. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée (+91,17%) dans nos essais de compression du BHP par rapport au béton ordinaire (BO).

Le tableau 4.1 et la figure 4.1 représentent l'évolution de la résistance à la compression des bétons testés au laboratoire. On constate une amélioration considérable de la résistance à la compression du béton à haute performance (BHP) par rapport au béton ordinaire de référence. La résistance à la compression du BHP est améliorée de 91,17%, de 81,12%, de 71,81% et de 69,56% à 7, 14, 21 et à 28 jours, respectivement.

Cette amélioration de la résistance à la compression est attribuée à :

- D'un côté, Aux matériaux locaux utilisés pour la confection des éprouvettes des essais mécaniques. En effet, l'augmentation de la résistance est déjà significative même pour le béton ordinaire formulé avec ces matériaux.
- D'un autre côté, l'introduction de la fumée de silice dans le béton à haute performance (BHP) conduit à une augmentation de la résistance à la compression. Cela est dû, évidemment, au double rôle que joue la fumée de silice dans la matrice du béton :
 - Premièrement, la fumée de silice densifie la pâte de ciment, grâce à ses particules ultrafines qui s'intercalent dans les pores créés lors de l'hydratation du ciment, entre les granulats et les produits d'hydratation.
 - Deuxièmement, la fumée de silice est considérée comme l'ajout le plus réactif : elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ, en se précipitant sous forme de C-S-H avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$, libéré lors de l'hydratation du ciment et par conséquent la résistance mécanique du béton s'améliore.
- Le dosage du ciment (450 Kg/m) dans le béton à haute performance (BHP) a aussi un effet certain sur l'augmentation de la résistance à la compression. L'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée à la diminution du rapport E/L (Eau / ciment +fumée de silice) dans le BHP et l'utilisation du superplastifiant haut réducteur d'eau. Les mêmes remarques ont été constatées par [14].

La résistance à la compression des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes pour un dosage de 0,5% de fibres métalliques, 1% de fibres métalliques et 1,5% de fibres métalliques sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.2).

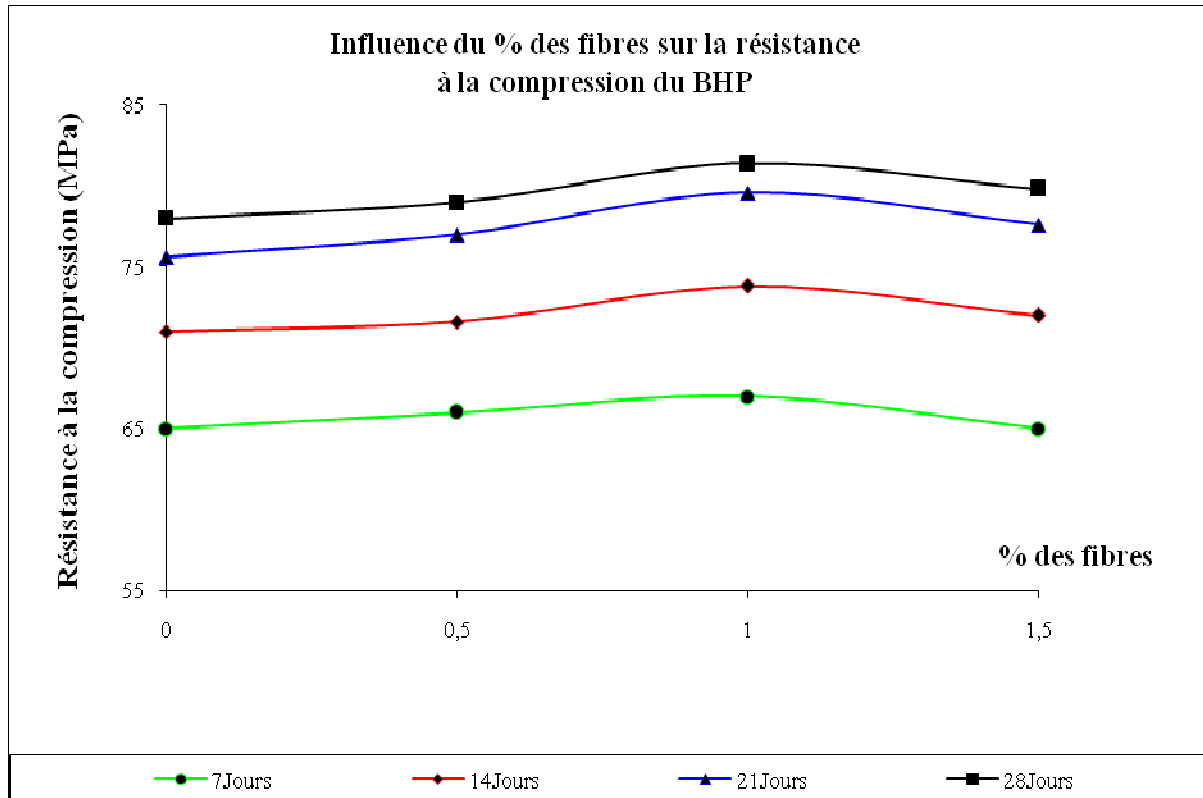


Figure 4.2: Effet du % des fibres métalliques sur la résistance à la compression du BHP durant la période de 28jours

Les résultats des différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres métalliques montrent généralement une augmentation légère de la résistance à la compression. Mais certains chercheurs affirment que les fibres améliorent légèrement la résistance à la compression. Tandis que d'autres ont trouvé que les fibres diminuent légèrement la résistance à la compression. C'est-à-dire les fibres ont un rôle surtout bénéfique sur la résistance à la traction et non à la compression.

Dans la matrice béton, les fibres peuvent avoir deux effets :

- les fibres ont un effet de couture des fissures provoquées par les charges extérieures ;
- les fibres évitent l'endommagement de la structure et donc elles limitent la charge maximale.

Des différentes études sur les bétons de fibres montrent que l'influence des fibres sur la

résistance à la compression est très faible. Une augmentation ou une diminution est tout à fait Possible, car les modes de mise en œuvre et les effets de paroi influent sur l'orientation des fibres et donc sur leur efficacité.

Bouheraoua montre une amélioration qui n'est pas significative pour toutes les étapes de développement de cette résistance [28]. Cette amélioration de la résistance ne dépasse pas 5% à 28 jours d'âge du béton pour une quantité idéale de fibre (1%) et donc pourrait être considérée comme insignifiante.

L'objectif de l'utilisation des fibres métalliques peut être résumé comme suivant :

- améliorer la résistance à la traction car la résistance en compression du béton est déjà suffisamment élevée,
- améliorer le comportement de la structure : la ductilité, son comportement vis à vis de la fatigue et de
- résistance face à l'usure et aux changements dynamiques et cycliques.

Les résultats obtenus lors de nos essais sur le BHP fibré par rapport au BHP témoin en laboratoire (tableau 4.1) montrent une augmentation faible de la résistance à la compression. Une étude [31] a montré que l'ajout des fibres métalliques de (0,5% et 1%) au béton à haute performance mène à une augmentation de la résistance à la compression du BHP de 0.89%, 11.57% à 7 et 28 jours respectivement. Mais dans le cas de l'ajout de 1,5% de fibres métalliques dans la matrice béton, la résistance à la compression diminue. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée dans nos essais.

La figure 4.2 représente l'influence du pourcentage des fibres sur la résistance à la compression du béton à haute performance (BHP). On constate qu'à l'âge de 7 jours la résistance à la compression du béton à haute performance augmente légèrement avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la compression est :

- de 1,53% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.
- de 3,07% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

Par contre, l'ajout de 1,5% de fibres métalliques au béton à haute performance n'a causé aucune augmentation de la résistance à la compression à 7 jours par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques. Cela est attribué à l'augmentation des vides d'air (pores) à cause du volume important de fibres métalliques.

A l'âge de 14 jours, on constate que la résistance à la compression du béton à haute performance augmente légèrement avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de cette résistance est :

- de 0,84% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 3,07% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 1,41% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 21 jours, on constate que la résistance à la compression du béton à haute performance augmente légèrement avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la compression est :

- de 1,85 pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 5,3% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 2,64% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 28 jours, on constate que la résistance à la compression du béton à haute performance augmente légèrement avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance est de :

- de 1,28 % pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 4,35% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 2,3% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

On conclut que l'effet de l'ajout des fibres métalliques sur la résistance à la compression du BHP est faible. L'ajout des fibres métalliques en faible pourcentage au BHP (jusqu'à la fraction de volume 1 %), apporte une légère augmentation de la résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance à la compression est probablement dû à:

- L'utilisation des fibres courtes à cause de leurs efficacités sur le comportement mécanique. Le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer. Par exemple une fibre courte pour augmenter les résistances en (traction, compression...) ou une fibre longue pour améliorer le comportement postfissuration du béton de fibre [25].

Par contre, en augmentant le volume des fibres dans le béton de haute performance (jusqu'à 1,5%), on remarque que la résistance à la compression tend à diminuer. Cela est probablement dû à :

- la présence des fibres engendre une mauvaise maniabilité conduisant à une moindre compacité globale ;
- L'augmentation du pourcentage des fibres métalliques croit la porosité au sein du BHP qui le fragilise.

4.1.2. Résistances à la traction par flexion et traction par fendage

Les essais de traction par flexion sont exécutés selon la norme NF P 18-407 sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) provenant de chaque gâchée de béton. Les essais de traction par fendage sont exécutés selon la norme NF P 18-408 sur des éprouvettes cylindriques (16x32cm) provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont Béton Ordinaire (BO), le Béton à Haute Performance (BHP), le Béton à Haute Performance fibré à 0,5% de fibres métalliques (BHP à 0,5% de fibres métalliques), le Béton à Haute Performance fibré à 1% de fibres métalliques (BHP à 1% de fibres métalliques) et le Béton à Haute Performance fibré à 1,5% de fibres métalliques (BHP à 1,5% de fibres métalliques). Les résultats des écrasements des éprouvettes durant la période de 28 jours sont présentés dans le tableau 4.2 et le tableau 4.3.

Tableau 4.2: Résultats des essais de traction par flexion des différents spécimens

	RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION (MPa)			
ÂGE DU BÉTON (JOURS)	7	14	21	28
BO	3,2	3,8	4,2	4,5
BHP témoin	5,4	6	6,3	6,5
BHPF (0,5%)	6,1	6,68	7	7,18
BHPF (1%)	6,5	7,12	7,56	7,82
BHPF (1,5%)	6,9	7,63	8,14	8,43

Tableau 4.3: Résultats des essais de traction par fendage des différents spécimens

	RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE (MPa)			
ÂGE DU BÉTON (JOURS)	7	14	21	28
BO	2,1	2,6	2,9	3,2
BHP témoin	3,5	4,1	4,48	4,7
BHPF (0,5%)	4,4	5	5,57	5,8
BHPF (1%)	5,25	5,9	6,3	6,5
BHPF (1,5%)	5,8	6,75	7,36	7,63

Les résultats de la résistance à la traction par flexion des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 28 jours sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.3).

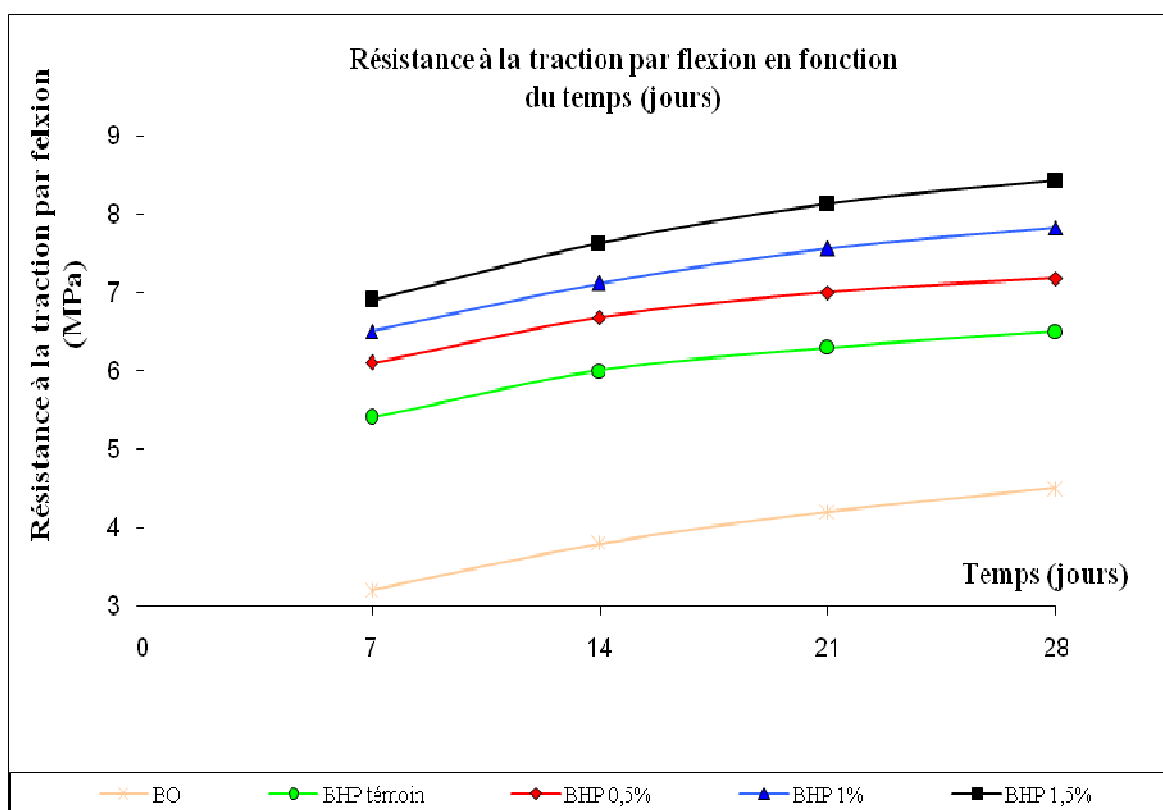


Figure 4.3: Résultats de l'évolution de la résistance à la traction par flexion du BHP en fonction du temps (jours)

La résistance à la traction par fendage des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 28 jours sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.4).

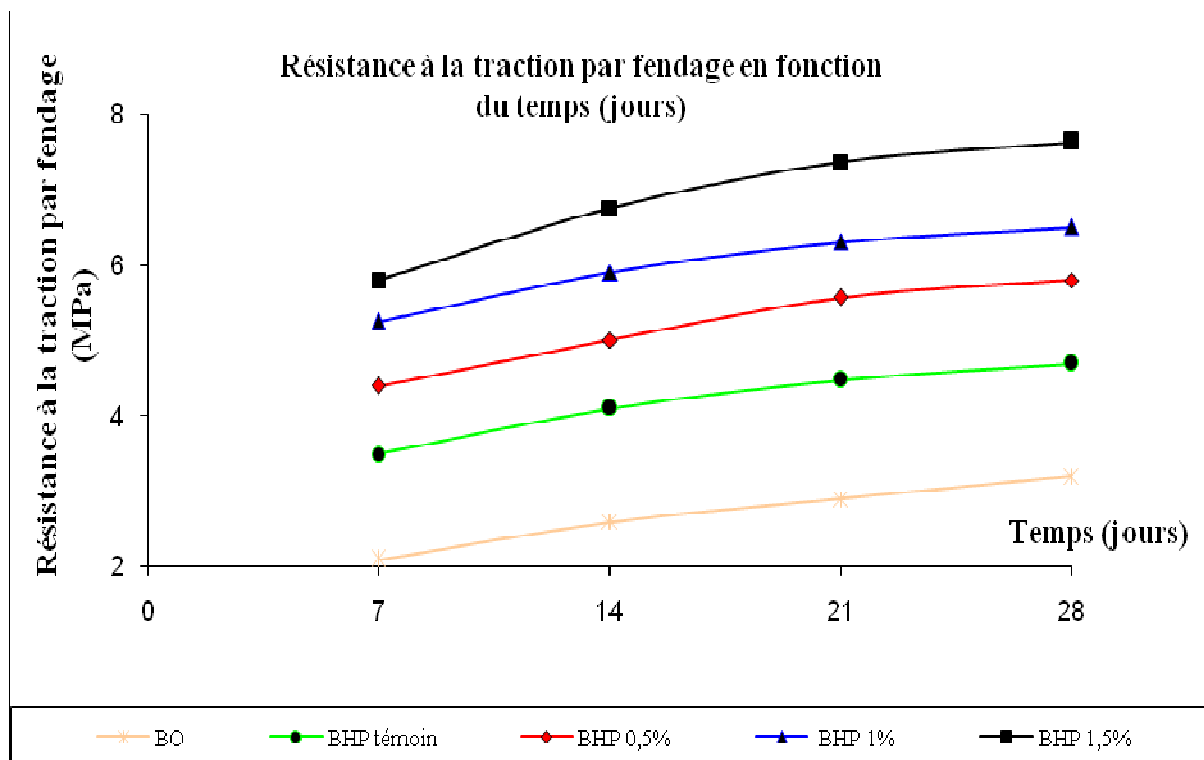


Figure 4.4: Résultats de l'évolution de la résistance à la traction par fendage du BHP en fonction du temps (jours)

Les résultats de traction par flexion obtenus lors de nos essais sur le béton à haute performance (BHP) sont ceux trouvés généralement par la majorité des chercheurs qui ont travaillé sur le béton à haute performance. L'utilisation de l'ajout minérale avec un E/C réduit et l'utilisation du superplastifiant augmentent la résistance à la traction par flexion du BHP par rapport au béton de référence d'environ 15,69%, 22,14% pour 7 et 28 jours respectivement [31]. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée (68,75%, 44,44% pour 7 et 28 jours respectivement) dans nos essais de traction par flexion du béton haute performance (BHP) par rapport au béton ordinaire (BO).

Le tableau 4.2 et la figure 4.3 représentent l'évolution de la résistance à la traction par flexion du Béton à haute performance (BHP) avec différent pourcentage des fibres métalliques à tous les âges d'essai comparés au béton ordinaire (BO). On constate une augmentation de la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance par rapport au béton ordinaire. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance comparé au béton ordinaire (BO) était de 68,75%, 57,9%, 50% et 44,44% à 7 jours, 14 jours, 21 jours, 28 jours respectivement

Les résultats de traction par fendage obtenus lors de nos essais sur le béton à haute performance (BHP) sont ceux trouvés généralement par la majorité des chercheurs. L'utilisation de l'ajout minérale, un E/C réduit et l'utilisation du superplastifiant augmentent la résistance à la traction par fendage du BHP par rapport au béton de référence (BO) d'environ 66,66%, 39,18% pour 7 et 28 jours respectivement [31]. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée (66,66%, 46,87% pour 7 et 28 jours respectivement) dans nos essais de traction par fendage du béton haute performance BHP par rapport au béton ordinaire (BO).

Le tableau 4.3 et la figure 4.4 représentent l'évolution de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance (BHP) avec différent pourcentage des fibres métalliques à tous les âges d'essai comparés au béton ordinaire de référence (BO). On constate une augmentation de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance par rapport au béton ordinaire. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance comparé au béton ordinaire était de 66,7%, 57,7%, 54,48% et 46,87% à 7 jours, 14 jours, 21 jours, 28 jours respectivement.

Cette augmentation de la résistance à la traction par flexion et par fendage est attribuée à :

- La réduction significative de la porosité de la matrice de ciment, aussi bien qu'à la bonne dispersion des grains de ciment dans tout le mélange,
- L'introduction de la fumée de silice qui a conduit à une croissance appréciable de résistance, cela est dû évidemment au double rôle que joue la fumée de silice dans la matrice du béton :
 - Premièrement elle densifie la pâte de ciment grâce à la petitesse de ses particules ultrafines qui s'intercalent dans les pores créés lors de l'hydratation du ciment et entre les granulats et les produits d'hydratation (auréole de transition), zone ou le maillon le plus sensible à la rupture dans un béton ordinaire surtout sous traction, ce n'est plus le cas dans un béton contenant de la fumée de silice où cette zone est plus dense et compact.
 - Deuxièmement, la fumée de silice est considérée comme l'ajout le plus réactif, elle commence à réagir après 2 à 3 jours environ en se précipitant sous forme de C-S-H avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libéré lors de l'hydratation du ciment et par conséquent la résistance mécanique du béton s'améliore.

La résistance à la traction par flexion des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes pour un dosage de 0,5% de fibres métalliques, de 1% de fibres métalliques et 1,5% de fibres métalliques sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.5).

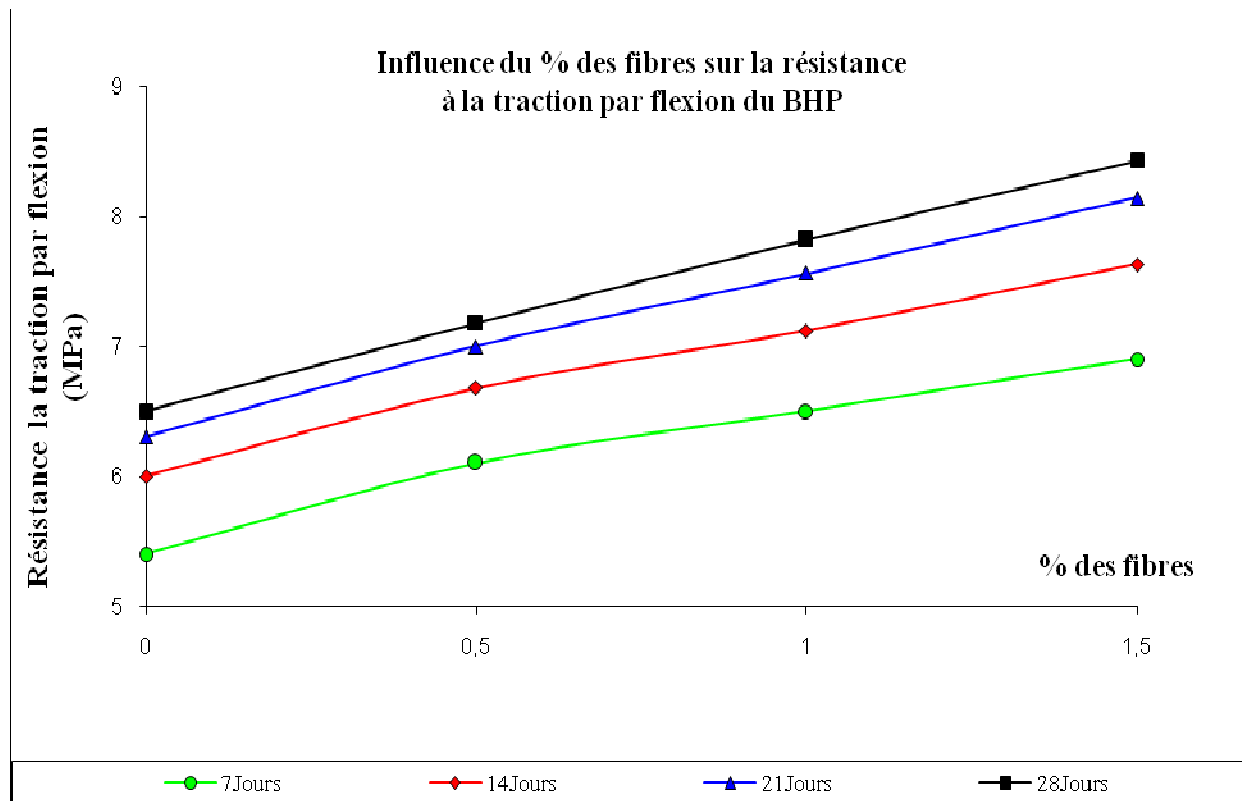


Figure 4.5: Effet du % des fibres métalliques sur la résistance à traction par flexion du BHP durant la période de 28jours

Des différentes études sur les bétons béton à haute performance fibrés [25] montrent que l'influence des fibres sur la résistance à la traction par flexion est très importante. Cette augmentation est due essentiellement à la présence et l'efficacité des fibres métalliques.

Les résultats obtenus lors de nos essais sur le béton à haute performance (BHP) fibré par rapport au béton à haute performance (BHP) témoin en laboratoire (le tableau 4.2) montrent une augmentation de la résistance à la traction par flexion. Une étude scientifique similaire sur le béton haute performance fibré [31] a montré que la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques jusqu'à 1,5% de fibres métalliques. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion était de 15,69%, 22,14% à 7 jours et 28 jours respectivement. Cette augmentation a été attribuée à la présence des fibres métalliques. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée dans nos essais.

La figure 4.5 représente l'influence du pourcentage des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance. On constate, qu'à l'âge de 7 jours, la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion est :

- de 12,69% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques ;
- de 20,37 % pour le BHP avec 1% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques ;
- de 27,77% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 14 jours, on constate une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion est :

- de 11,33% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 18,66% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 27,16% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;

A l'âge de 21 jours, on constate une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion est :

- de 11,11% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 20% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 29,2% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;

A l'âge de 28 jours, on constate on constate une légère augmentation de la résistance à la traction par flexion du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par flexion est :

- de 10,46% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 20,30% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;

- de 29,69 % pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

La résistance à la traction par fendage des écrasements effectués sur les différentes éprouvettes pour un dosage de 0,5% de fibres métalliques, de 1% de fibres métalliques et 1,5% de fibres métalliques sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.6).

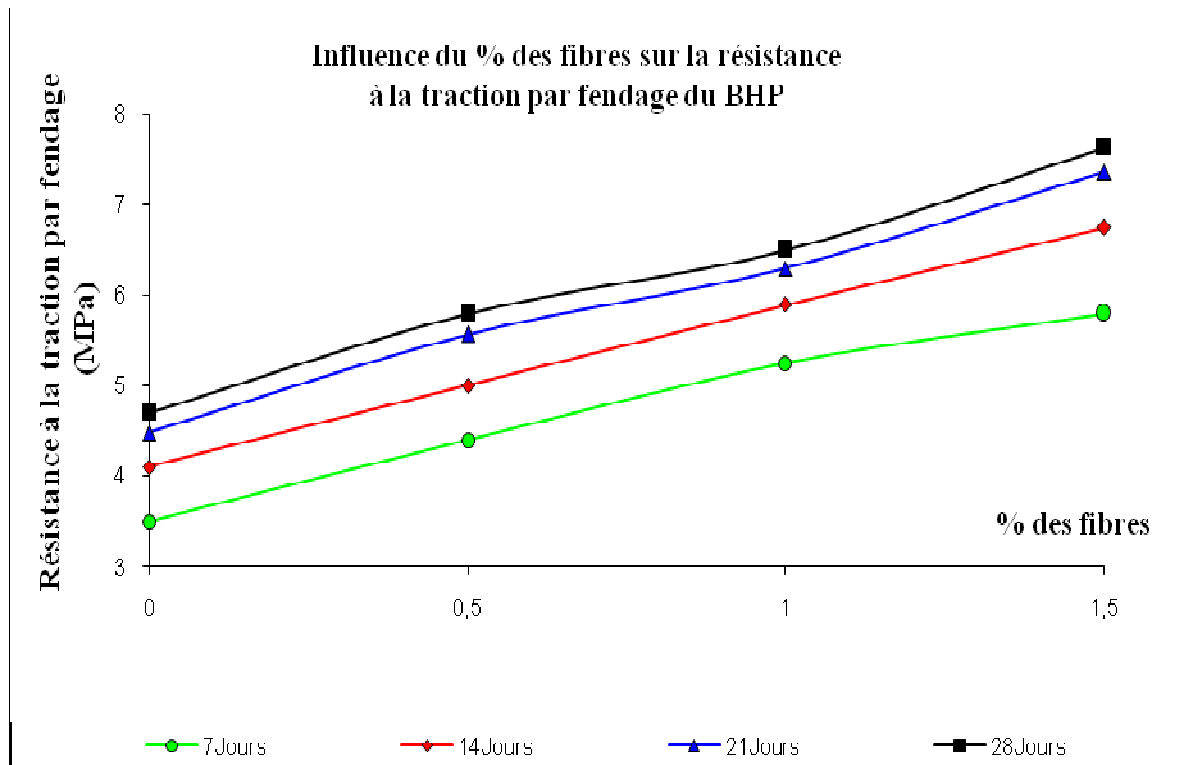


Figure 4.6: Effet des fibres métalliques sur la résistance à traction par fendage du BHP durant la période de 28jours

Les résultats obtenus lors de nos essais sur le béton à haute performance fibré par rapport au béton à haute performance témoin en laboratoire (tableau 4.2) montrent une augmentation de la résistance à la traction par fendage. Une étude scientifique [31] a montré que La résistance à la traction par fendage du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le pourcentage de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage était de 64,28%, 63.86% à 7, 28 jours respectivement. Cette augmentation à été attribué au rôle des fibres métalliques. L'influence des fibres sur la résistance à la traction par fendage est très importante. Les essais de fendage donnent généralement des bons résultats sur la résistance à la traction par rapport aux essais de flexion.. Cette constatation est celle que nous avons retrouvée dans nos essais.

La figure 4.6 représente l'influence du pourcentage des fibres métalliques sur la résistance à la traction

par fendage du béton à haute performance. On constate qu'à l'âge de 7 jours, la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage est :

- de 25,71%, pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 50 % pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 65,71% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 14 jours, on constate une augmentation de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage est :

- de 22% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 43,9% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 64,63% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 21 jours, on constate une augmentation de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage est :

- de 24,33% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 40,62% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 64,28% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 28 jours, on constate une augmentation de la résistance à la traction par fendage du béton à haute performance avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la résistance à la traction par fendage est :

- de 23,40% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;

- de 38,3% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques ;
- de 62,34% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques.

On conclut que l'effet de l'ajout des fibres métalliques sur la résistance à la traction du BHP est important. L'ajout des fibres métalliques au BHP (jusqu'à 1,5 % de fibres métallique) augmente la résistance à la traction. L'influence des fibres sur la résistance à la traction par fendage est très importante et donne de bons résultats sur la résistance à la traction par rapport à l'essai de flexion.

Cette augmentation de la résistance à la traction peut être attribuée à :

- Les fibres métalliques jouent un rôle très important à l'amélioration de la résistance à la traction par flexion des bétons [19] ;
- La forme des fibres joue un rôle très important, les fibres munies de crochets sont très efficaces, en offrant une meilleure ductilité. Elles sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique. Le crochet développe progressivement un ancrage, puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci et par frottement à l'interface avec la matrice [26, 27] ;
- La teneur en fibres aussi joue un rôle important, car l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques dans un béton augmente leur efficacité vis-à-vis à la résistance à la traction (par flexion, par fendage) [25] ;
- Les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes. Alors l'utilisation des fibres courts a pour but l'amélioration de la résistance à la traction [25].

En ce qui concerne le mode de rupture lors de l'essai de compression, on a remarqué que dans le cas du béton ordinaire la rupture en compression s'est produite le long des granulats. On assiste alors à un déchaussement important de ces derniers (granulats). Il paraît que la liaison pâte de ciment–granulats constitue la zone la plus faible de ce béton, sans doute, à cause du fort dosage en eau, qui fragilise le lien entre la pâte de ciment et le granulat.

Pour le béton haute performance (BHP), on constate que la rupture survient brutalement sans aucun

signe préventif. Ceci se traduit par l'accroissement de la résistance, qui va souvent avec une plus grande fragilité.

Si on visualise à l'œil nu les faciès de la rupture, on remarque que les plans de fractures traversent différemment les granulats et la liaison pâte-granulats. Cela s'explique comme suit : l'effort appliqué est réparti entre la zone de transition et les granulats, là où la rupture s'est produite au niveau de la transition, c'est plutôt les granulats qui ont une bonne résistance.

Si la rupture est transgranulaire, c'est les granulats qui ne sont pas assez résistants.

Examinons maintenant de plus près le mode de rupture des deux bétons sous l'effort de traction par fendage. On assiste à un déchaussement des contours des grains inertes en se situant à la périphérie de ceux de transition, zone mécaniquement plus faible et plus sollicitée surtout en réalité. Il se produit une rupture progressive des zones tendues et la séparation se produit entre granulats et la pâte de ciment.

En revanche, dans le cas du BHP, en observant les plans de rupture, on remarque qu'il y a des granulats fendus (la rupture a lieu dans le granulat [25]). Ce qui s'est traduit par un aspect de surface lisse. L'existence d'une zone de transition renforcée par la présence de la fumée de silice a favorisé la rupture des granulats plutôt que celle de la matrice.

Le résultat obtenu pour le mode de rupture des deux bétons nous permet de conclure que :

- la sélection des granulats devient cruciale lors de la confection d'un béton à hautes performances. En effet étant donné que dans le BHP ; la pâte de ciment hydraté et la zone de transition sont suffisamment fortes, les granulats peuvent devenir le maillon faible du béton. Ainsi la résistance du béton pouvant être limitée par celles des granulats eux-mêmes.
- le fait que la rupture s'est produite dans le granulat, cela veut dire que la zone de transition, reconnue comme le chaînon le plus faible dans un béton ordinaire, est rendue plus résistante que les granulats. L'incorporation de la fumée de silice a bien un effet densifiant.

Concernant le mode de rupture sous le chargement en flexion, on a eu un comportement similaire à celui observé avec le chargement en fendage. Dans tous les cas de rupture, on assiste à la cassure de l'éprouvette en deux parties. La fracture se localise au centre du prisme.

Toutefois les valeurs obtenues sont légèrement supérieures à celles des valeurs de résistance par fendage. La différence de valeurs entre la résistance au fendage et en flexion réside dans le fait que les granulats participent beaucoup moins à la résistance par flexion par rapport à la pâte liante. La

contrainte de flexion appliquée est mieux répartie entre les différents constituants du béton (granulat, pâte de ciment durci).

4.1.3. Indice sclérométrique

Les essais de scléromètre sont exécutés selon la norme NF P.18-417 sur des éprouvettes cubiques (10x10x10cm) provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont Béton Ordinaire (BO), le Béton à Haute Performance (BHP), le Béton à Haute Performance fibré à 0,5% de fibres métalliques (BHP à 0,5% de fibres métalliques), le Béton à Haute Performance fibré à 1% de fibres métalliques (BHP à 1% de fibres métalliques) et le Béton à Haute Performance fibré à 1,5% de fibres métalliques (BHP à 1,5% de fibres métalliques). Les résultats de scléromètre sur des éprouvettes durant la période de 28 jours sont présentés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Résultats des essais de scléromètre des différents spécimens

	L'indice sclérométrique (Is)			
ÂGE DU BÉTON (JOURS)	7	14	21	28
BO	22	25	28	30
BHP témoin	41	45	47	49
BHPF (0,5%)	43	46	48	50
BHPF (1%)	42	45	48	51
BHPF (1,5%)	42	45	49	50

L'indice sclérométrique des essais de scléromètre effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 28 jours sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.7).

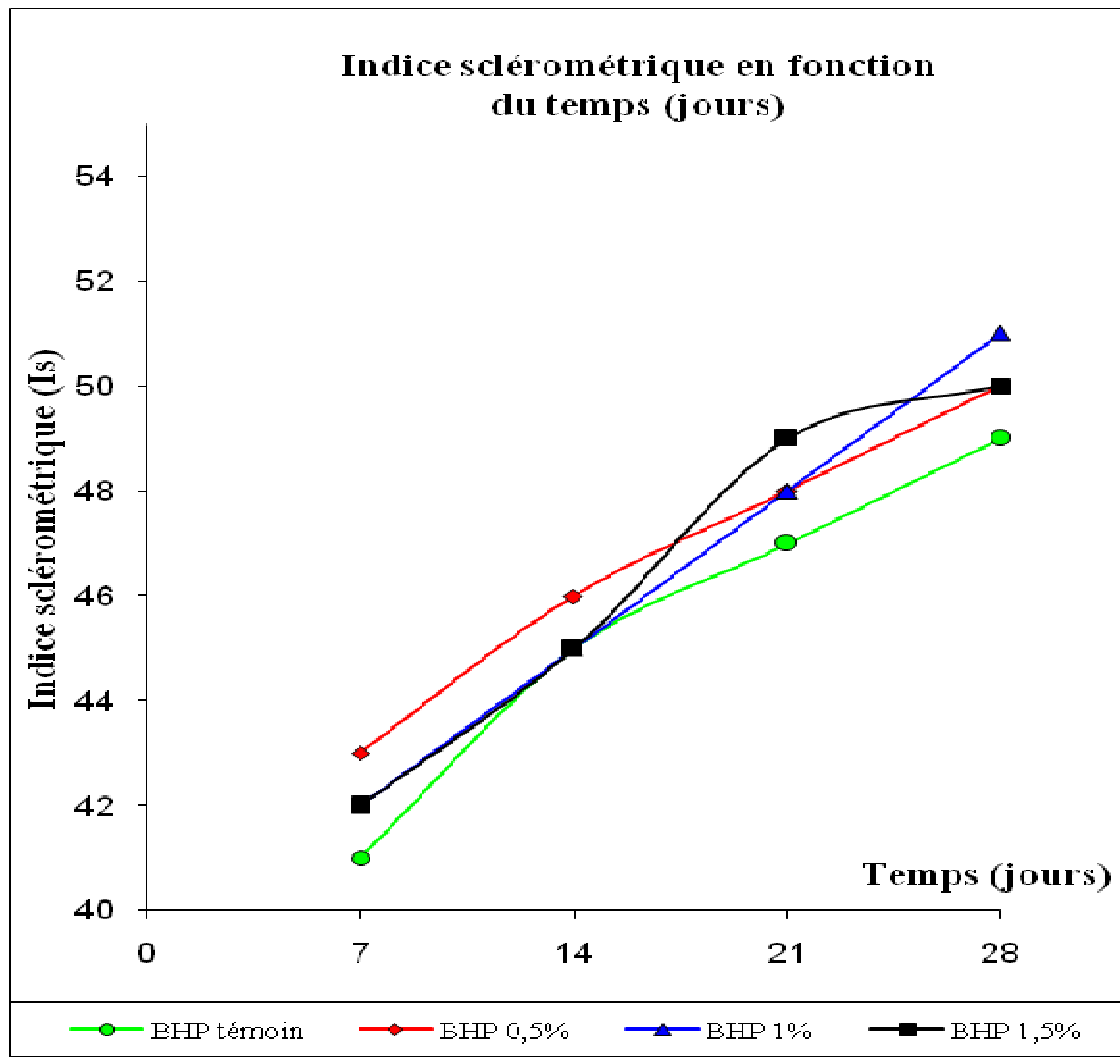


Figure 4.7 : Indice sclérométrique du BHP en fonction du temps (jours)

Le tableau 4.4 et la figure 4.7 représentent l'évolution de l'indice sclérométrique en fonction de l'âge du béton. On constate une augmentation de l'indice sclérométrique dans le BHP par rapport à celle du béton ordinaire (BO). Le pourcentage de l'augmentation de l'indice sclérométrique était de 68,63%, 80%, de 67,85% et de 63,33% à 7 jours, 14 jours, 21 et 28 jours respectivement.

Cette augmentation de l'indice sclérométrique est attribuée à :

- La bonne compacité du BHP, qui est assurée essentiellement par la forte réduction de la quantité d'eau de gâchage et l'utilisation conjointe de la fumée de silice et du superplastifiant.

Ce qui concerne le béton à haute performance renforcé de 0,5%, 1%, 1,5% de fibres métalliques. On ne constate que la présence des fibres métalliques n'a pratiquement aucune influence sur l'indice sclérométrique.

4.1.4. Vitesse de propagation du son

Les essais d'ultrason sont exécutés selon la norme NF P.18-418 sur des éprouvettes cubiques (10x10x10cm) provenant de chaque gâchée de béton. Les bétons utilisés pour la confection de ces éprouvettes sont Béton Ordinaire (BO), le Béton à Haute Performance (BHP), le Béton à Haute Performance fibré à 0,5% de fibres métalliques (BHP à 0,5% de fibres métalliques), le Béton à Haute Performance fibré à 1% de fibres métalliques (BHP à 1% de fibres métalliques) et le Béton à Haute Performance fibré à 1,5% de fibres métalliques (BHP à 1,5% de fibres métalliques). Les résultats d'ultrason sur des éprouvettes durant la période de 28 jours sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5: Résultats des essais d'ultrason des différents spécimens

ÂGE DU BÉTON (JOURS)	Vitesse de propagation du son (m/s)			
	7	14	21	28
BO	3700	3950	4100	4320
BHP témoin	4100	4320	4530	4740
BHPF (0,5%)	4100	4400	4600	4762
BHPF (1%)	4150	4390	4580	4693
BHPF (1,5%)	3976	4300	4550	4650

La vitesse de propagation du son des essais d'ultrason effectués sur les différentes éprouvettes durant la période de 28 jours sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.8).

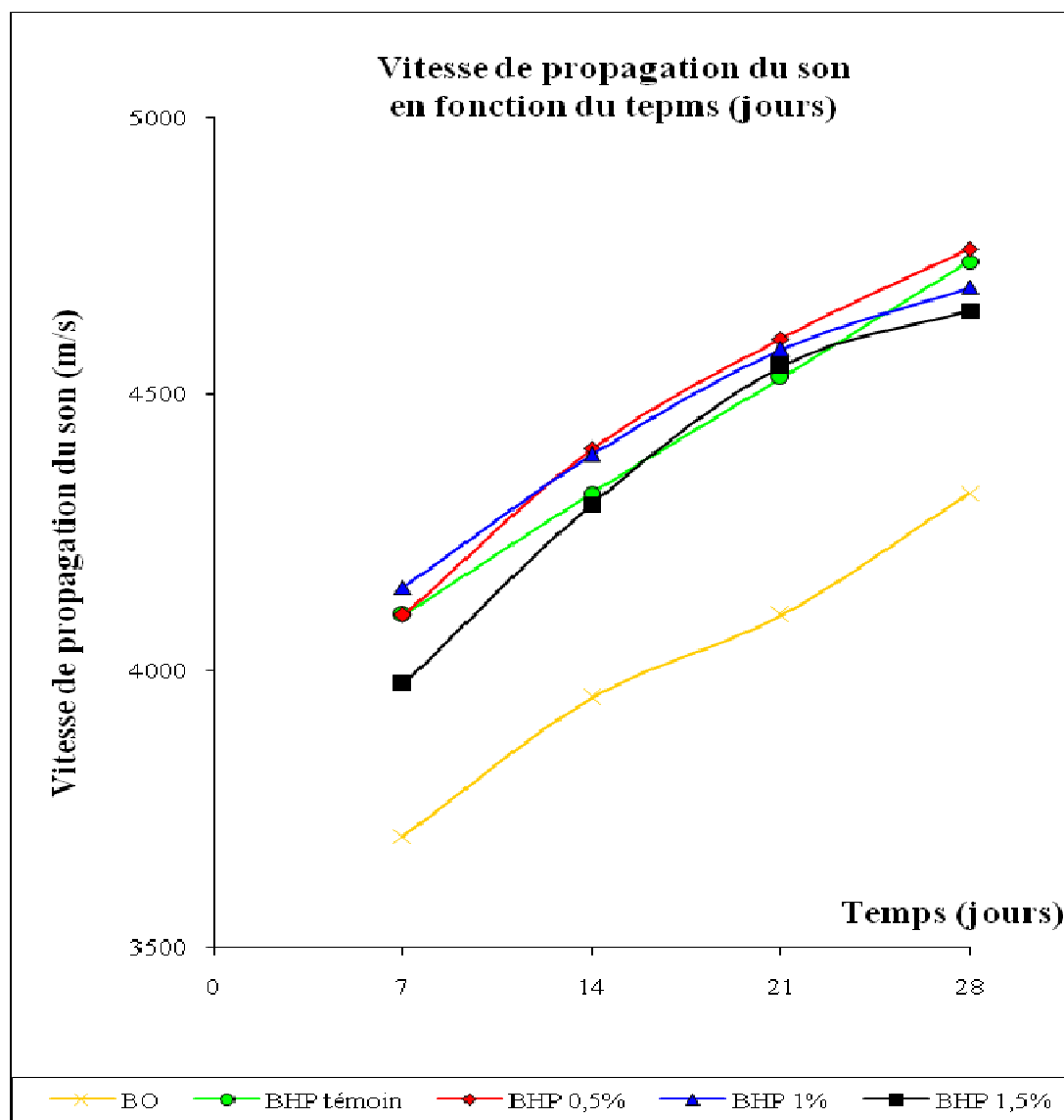


Figure 4.8 : Vitesse de propagation du son du BHP en fonction du temps (jours)

Le tableau 4.5 et la figure 4.8 présentent l'évolution de la vitesse de propagation du son en fonction de l'âge du béton. On constate une augmentation claire de la vitesse de propagation du son dans le béton à haute performance (BHP) par rapport à celle du béton ordinaire (BO). Le pourcentage de l'augmentation de la vitesse de propagation du son du BHP par rapport à celle du béton ordinaire était de 10,81%, de 9,36%, de 10,48% et de 9,72% à 7 jours, 14 jours, 21 jours et 28 jours respectivement. Cette augmentation de la vitesse de propagation du son peut être interprétée par la bonne compacité du béton à haute performance (BHP), assurée, essentiellement par la forte réduction de la quantité d'eau de gâchage et l'utilisation conjointe de la fumée de silice et du superplastifiant. Ce qui assure une bonne homogénéité et une densification de la matrice du béton.

La vitesse de propagation du son des essais d'ultrason effectués sur les différentes éprouvettes en

béton haute performance pour un dosage de 0,5% de fibres métalliques, 1% de fibres métalliques et 1,5% de fibres métalliques sont représentés dans le graphique suivant (figure 4.9).

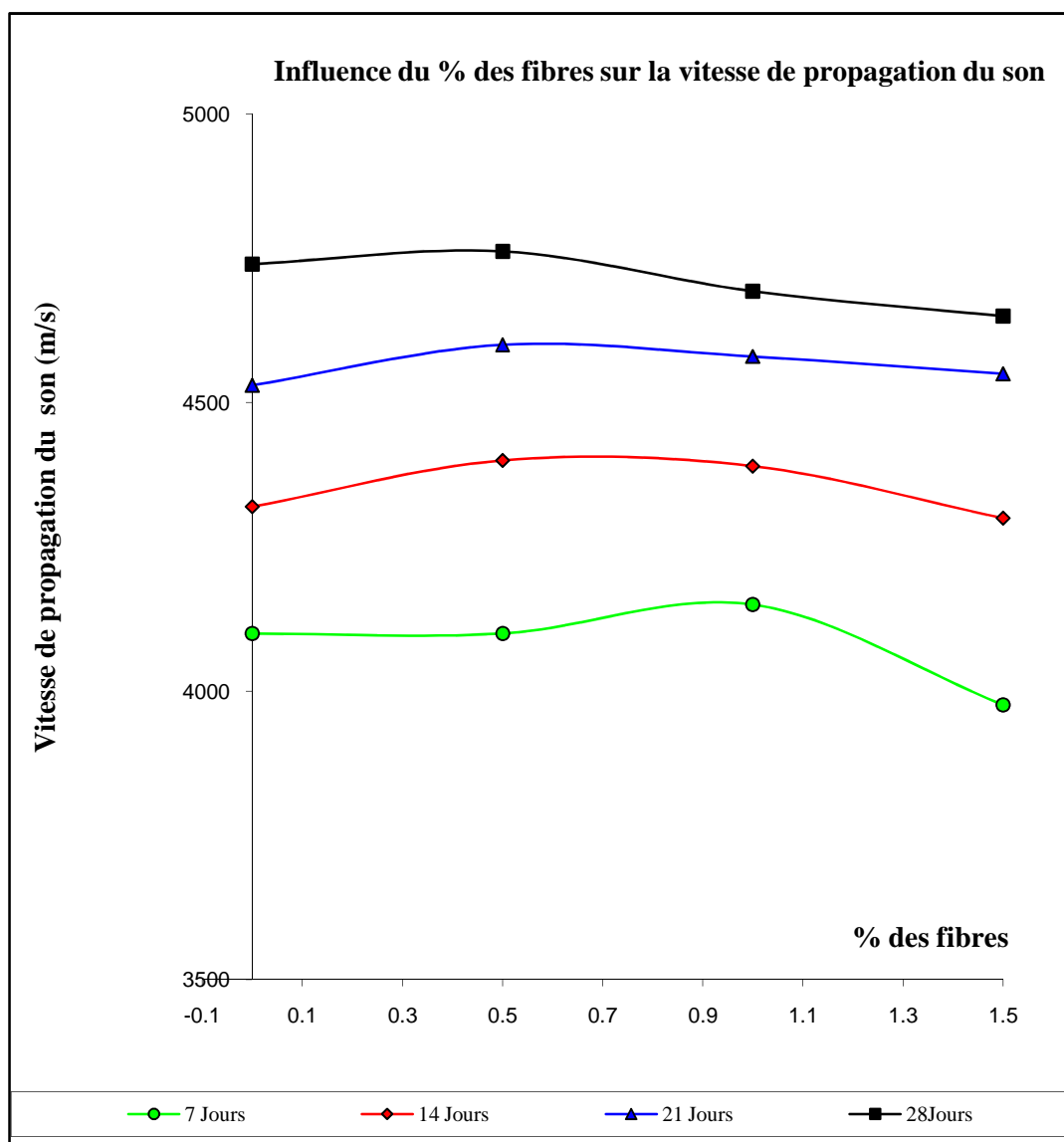


Figure 4.9: Influence du % des fibres sur la vitesse de propagation du son du BHP

La figure 4.9 présente l'influence du pourcentage des fibres sur la vitesse de propagation du son pour le béton à haute performance (BHP). On constate, qu'à l'âge de 7 jours, la vitesse de propagation du son ne présente aucune augmentation pour un béton à haute performance avec 0,5% de fibres métalliques. La vitesse du son présente une légère augmentation. Le pourcentage de l'augmentation de la vitesse du son était de 1,21% pour un béton à haute performance avec 1% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques (témoin). Par contre, l'ajout de 1,5% de fibres métalliques a causé une légère diminution de la vitesse de propagation du son. Le pourcentage

la diminution de la vitesse de propagation du son était de 3,11% pour un béton à haute performance avec 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques (témoin). Cela est attribué à l'augmentation des vides d'air à cause du volume important des fibres métalliques présents dans le béton haute performance.

A l'âge de 14 jours on constate une légère augmentation de la vitesse de propagation du son pour le béton à haute performance (BHP). Le taux de l'augmentation de la vitesse de propagation du son est :

- de 1,85% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques ;
- de 1,62% pour le BHP avec 1% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques.

Par contre l'ajout de 1,5% de fibres métalliques au béton à haute performance causé une légère diminution de la vitesse de propagation du son.

Le pourcentage de la diminution de la vitesse du son est :

- de 0,46% pour le béton à haute performance (BHP) avec 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 21 jours on constate une légère augmentation de la vitesse de propagation du son de béton à haute performance (BHP) avec l'augmentation du pourcentage des fibres métalliques. Le taux de l'augmentation de la vitesse de propagation du son est :

- de 1,54% pour le BHP à 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques ;
- de 1,1% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques ;
- de 1% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques.

A l'âge de 28 jours, on constate une légère augmentation de la vitesse de propagation du son de béton à haute performance (BHP). Le taux de l'augmentation de la vitesse de propagation du son est de 0,46% pour le BHP avec 0,5% de fibres métalliques par rapport au béton haute performance sans fibres métalliques (témoin).

Par contre, l'ajout de 1% et 1,5% de fibres métalliques au béton à haute performance causé une légère diminution de la vitesse de propagation du son. Le taux de la diminution de la vitesse du son est :

- de 1% pour le BHP à 1% de fibres métalliques par rapport au béton à haute

performance sans fibres métalliques ;

- de 1,93% pour le BHP à 1,5% de fibres métalliques par rapport au béton à haute performance sans fibres métalliques.

On conclut que l'ajout des fibres métalliques en faible pourcentage (jusqu'à la fraction de volume 1%) au béton à haute performance (BHP) apporte une légère augmentation de la vitesse de propagation du son. Par contre, en augmentant le volume des fibres, jusqu'à la fraction de volume 1,5% de fibres métalliques, la vitesse de propagation du son diminue. Cela est probablement dû à la création d'une porosité au sein du matériau a cause de volume important de fibres métalliques.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au renforcement du béton à haute performance par les fibres métalliques. Notre attention a été portée sur le comportement mécanique du BHPFM et notamment la notion de fragilité (essentielle pour l'utilisation de ce matériau), en comparaison avec un béton à haute performance témoin (sans fibres métalliques). La résistance à la compression, à la traction (par flexion et par fendage), l'indice sclérométrique et la vitesse de propagation du son ont pu être en évidence. Pour réaliser les éprouvettes d'essai, des fibres métalliques provenant de la société Sika sous le nom de Dramix (METAL FIBRES VISCOCHAPE) ont été utilisées.

Sur la base des résultats expérimentaux, des remarques dégagées, nous aboutissons aux conclusions suivantes :

- L'ouvrabilité du béton frais (BHP, BHPFM) est vérifiée par l'essai cône d'Abrams. Les résultats montrent que celle-ci diminue lorsque le pourcentage en fibres métalliques augmente. Des compositions de béton adéquates sont déterminées et ce en fonction du pourcentage de fibres incorporées.
- L'ajout des fibres au béton à haute performance, en faible pourcentage, apporte une légère augmentation de la résistance de compression, par contre en augmentant le volume des fibres, celle-ci tend plutôt à diminuer. Cela est probablement dû à la création d'une porosité au sein du matériau qui le fragilise.
- L'ajout des fibres métalliques jusqu'à la fraction de volume 1,5% au béton à haute performance a causé une augmentation significative de la résistance à la traction (par flexion, par fendage) comparé par béton à haute performance sans fibres métalliques à tous les âges des essais. Cette augmentation est attribuée au mécanisme des fibres métalliques. La forme des fibres joue un rôle très important les fibres munies de crochets sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique. Le crochet développe progressivement un ancrage, puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci et par frottement à l'interface avec la matrice. La teneur en fibres aussi joue un rôle important, l'augmentation du pourcentage des fibres dans un béton de fibre se traduit par une augmentation de leur efficacité vis-à-vis de la résistance à la traction (par flexion, par fendage). Les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes. Alors l'utilisation des fibres longues a pour but de l'amélioration de la résistance à la traction.

- L'ajout des fibres métalliques en faible pourcentage au BHP (jusqu'à la fraction de volume 1 %), apporte une légère augmentation de vitesse de propagation du son, par contre en augmentant le volume des fibres (jusqu'à la fraction de volume 1,5%), celle-ci tend à diminuer la vitesse de propagation du son. Cela est probablement dû à la création d'une porosité au sein du matériau.
- La densité des fibres et leur position, constituent un paramètre prépondérant à l'aboutissement de résultats performants des résistances du béton et particulièrement en traction. Les fibres sont placées dans la masse du béton d'une façon tout à fait aléatoire et très probablement on peut tomber dans des zones de faibles densités en fibres. Alors peut constituer un risque sur la résistance du béton.
- L'investigation expérimentale est une étape essentielle pour mettre en évidence l'influence des paramètres de composition des matériaux sur la résistance des BHP. Nos résultats constituent un plus qui permet de mieux comprendre le rôle de l'ajout des fibres dans les bétons. Des travaux ont été déjà réalisés au sein de notre laboratoire pour la confection des bétons à hautes performances. Nous proposons dans la suite de nos travaux d'approfondir ces recherches pour la confection d'un BHP adéquat avec nos matériaux locaux. Nos éventuelles études peuvent aussi s'intéresser à :
 - L'Etude des paramètres de résistance des bétons à hautes résistances fibrés en traction, fluage, retrait ...,
 - L'influence des paramètres de composition des matériaux sur le risque de fissuration à différents âges des bétons à haute résistance fibrés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D.BENAMARA et B. MEZGHICH. « *Vers un béton de haute performance élaboré de matériaux locaux «BHP»* ». Courrier du Savoir – N°10, Avril 2010, pp.09-14.
- [2] H. GAHER. « *Analyse de la résistance à la traction indirect et du retrait des bétons à haute performance* ». Thèse de magister, USTHB, 2004.
- [3] P-C. AÏTCIN. « *Bétons haute performance* ». Édition, Eyrolles, Janvier 2001.
- [4] Y. MALIER. « *Les BHP: caractérisation, durabilité et applications* ». Presse de l'E.N.P.C, Paris, 1992.
- [5] R. KHATTAB. « *Élaboration d'un béton a haute performance* ». ENP, Alger, novembre 1998
- [6] CIM béton. « *Les bétons : formulation fabrication mise en oeuvre* ». Tome2, 134p.
- [7] J.YAMMINE. « *Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques* ». Thèse de doctorat, ENSC, 2007.
- [8] P.COUSSOT, C. ANCEY. « *Rheophysics of pastes and suspensions* ». EDP Sciences, Paris, 300p, 1999.
- [9] R.-J, FLATT, N.-S. MARTYS, L. BERGSTROM. « *La rhéologie des matériaux cimentaires* ». Revue Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, No 867, pp. 48-55, Juin- Juillet 2004.
- [10] J.P. JACOBS et al. « *Le béton à haute performance* ». Bulletin FEBELCEM, 2007
- [11] A. M. NEVILE. « *Propriétés des bétons* ». Édition Eyrolles 2000.
- [12] K.-R. WU, B. CHEN, W. YAO, D. ZHANG. « *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete* ». Cement and Concrete Research Vol 31, pp 1421–1425, Juin 2001.
- [13] F. De LARRARD, V. BAROGHEL- BOUNY. « *Vieillessement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI siècle* ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 225, Mars - Avril 2000, pp 51-65.
- [14] F. BENSLAFA et al. « *Influence des paramètres de composition sur les caractéristiques mécanique d'un BHP* ». 1st International Conférence on SBEIDCO, ENSET Oran (Algérie) - October 12-14, 2009.
- [15] P. ROSSI. « *Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of French research* ». ACI Materials Journal, vol. 91, n° 3, 1994, pp. 273-279.
- [16] P. ROSSI, N. HARROUCHE, F. LEMAOU. « *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, décembre 1989, n°479 bis, pp. 166-183.

- [17] M.CHEMROUK, T.TAHENNI et B.BOULEKBEICHE. «*Béton renforcé en fibres:un matériau aux avantages multiples*». 1^{ère} Conférence Internationale sur les Energies, Matériaux et Environnement CIEME'09 Centre Universitaire de Khemis Miliana, 22 et 23 Novembre 2009
- [18] AE. Naaman. «*Fiber Reinforced Concrete- State of Progress at the Edge of the New Millennium*». 9th Conference on Concrete Engineering and Technology (CONCET), Kuala Lumpur, Malaysia 2006.
- [19] Y.FRITIH. «*Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*». Thèse de doctorat, INSA de Toulouse, 2009.
- [20] M.M.BENTALHA. «*Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone - Microstructure*». Thèse de doctorat d'état, Université Mentouri-Constantine, octobre, 2007.
- [21] S.RICHANE. «*Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton*». Thèse de Magister, U. M^{ed} BOUDIAF M'SILA, juillet, 2004.
- [22] C. PASCAL. «*Béton renforcés de fibres métalliques: du matériaux à la structure Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant* ». Thèse de doctorat. L'ENPC, juin, 1995.
- [23] P. SUKONTQSUKKUL. «*Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending*». Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep. 2004) pp. 35-41.
- [24] R.PIERRE. «*Fissuration du béton, au matériaux a la structure. Application de la mécanique linéaire de la rupture*». Thèse de doctorat, L'ENPC, 1987.
- [25] R.PIRRE. «*Les bétons de fibres métalliques* ». Presse de l'E.N.P.C, Paris, 1994.
- [26] R.F. ZOLLO. «*Fibrous concrete flexural testing-Developing standardized techniques*». *ACI Materials Journal*, vol. 77, n°5, 1980, pp.363-368.
- [27] G.CHANVILLARD. «*Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire*». *Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées: OA12*, 1993.
- [28] A.BOUHERAOUA. «*Effet des fibres bi-ondulées sur le comportement du béton*». Etude expérimentale, thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2006.
- [29] P. Casanova. «*Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure*». LCPC. 1996
- [30] P.K.MEHTA. «*Concrete: structure, properties, and materials*». Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986, 450p

- [31] Shakir A.Salih, Saeed K. Rejeb, Khalid B. Najem. «*The effect of steel fibers on the mechanical properties of high performance concrete*». 19 avril 2005.
- [32] A.ADJRAD. «*Renforcement du béton par des copeaux métalliques, étude expérimentale et modélisation*». Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2000.
- [33] M.CHEMROUK. «*High performance concrete: selection of the mix constituents to produce a highly performing and durable building material*». EPAU.
- [34] K. H. KHAYAT. «*Technologie du béton* ». GCI 340, Université de Sherbrooke, Octobre 1995.
- [35] N.R. Andriamanantsilavo. «*Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation*». Thèse de doctorat à l'Université de Bretagne sud, 2003.
- [36] J. Baron., J.P. Olivier. Et J.C. Weiss. «*Chapitre 1A : Les ciments courants, Les bétons Bases et données pour leur formulation*». Sous la direction de Jacques .BARON, Jean-Pierre OLIVIER, Ed Eyrolles, 1996.
- [37] Groupe ciments Français. «*Sous la direction de J.C. Bastide, la fabrication du ciment*». Ed.Eyrolles, 1993.
- [38] F. De LARRARD. «*Formulation des bétons à très hautes performances* ». Thèse de doctorat de l'ENPC, rapport de recherche LPC N° 149, Mai 1988.
- [39] L. PLISKIN. «*La fabrication du ciment* ». Edition Eyrolles, 217p- Paris1993.
- [40] K. Pokkuluri. «*Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range*» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.
- [41] M. Regourd. H. Hornain. «*Applications de la microscopie électronique à balayage* ». Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.
- [42] E. Guillon. «*Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles* ». Thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.
- [43] Y. Older. «*Hydration, setting and hardening of Portland cement* ». Dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4 éd- 1998.
- [44] P-C. AÏTCIN, S. JIANG, B. Gi KIM, P-C. NIKINAMUBANZI, N. PETROV. «*Compatibilité ciment-superplastifiant, cas des polysulfonates* ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°233, Juillet - août 2001, pp 87-98.
- [45] A. BOUDCHICHA. «*Utilisation des additions des minérales et des adjuvants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des béton*». Thèse de doctorat, UMC, 2007.

[46] M. N. OUDJIT. « *Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment Portland* ». Thèse docteur-ingénieur. Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, Janvier 1986.

[47] M. HAMRAT. « *Béton à haute performance Formulation, propriétés, rhéologique et mécaniques* ». Thèse de magister, UHBBC. Juillet 1994.

[48] G.DREUX et J.FESTA. « *Nouveau guide de béton et de ces constituants* ». Edition EYROLLEE. 7^{ème} Edition 1995.