Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Dr. YAHIA Farés De Médéa

Faculté des Sciences et de La Technologie

Département du Génie de la Matière

Filière Génie Civil

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Option : Structures

THEME

COMPORTEMENT DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS A BASE DES FIBRES PLASTIQUES

Réalisé par

Mr. SEMMANA Oualid

Mr. DAHMANI Hamza

Encadré par

Dr. DEBIEB Farid

Co-encadré par

Mr. IRKI Ilyes

PROMOTION: JUIN 2014

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au sein du laboratoire du béton de Hall de Technologie de Médéa.

On tient à remercier en premier lieu DIEU "Allah" Miséricordieux qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce modeste travail.

On adresse nos remerciements à notre promoteur de mémoire, Dr. DEBIEB Farid, on le remercie de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

On remercie également Mr. IRKI Ilyes, à la fois présent et disponible, nos sincères remerciements pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Et sans oublier à remercier les responsables de laboratoires qui nous ont aidé et fournit les moyens pour réaliser cette recherche.

On voudrait remercier nos familles (qu'on dédie ce travail) pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Finalement, merci pour toutes personnes qui nous ont aidé de près ou de loin.

Hamza et Oualid

ملخص

الدراسة الحالية تهتم بتأثير تقوية الخرسانة الذاتية الوضع باستعمال الألياف البلاستيكية
ثلاث عائلات من الخرسانة المثبتة و المقواة بالألياف البلاستيكية (المتموجة و المستقيمة) مع مقدار نسبة الزيادة بنسبة 0.3% إلى 1.2 %
النتائج المحصل عليها بأن تدخل الألياف البلاستيكية تأثر سلبا على الحالة المرنة للخرسانة الذاتية الوضع و تحسن في المقاومة للسحب و معامل الشدة من المرونة

الكلمات المفاتيح : الخرسانة الذاتية الوضع ;الألياف البلاستيكية ; الخرسانة الذاتية الوضع المقواة بالألياف البلاستيكية الخرسانة في الحالة المرنة و الحالة الصلبة

RESUME

La présente recherche, s'intéresse aux éffets du renforcement des bétons autoplaçants par des fibres plastiques.

Trois familles de bétons autoplaçants renforcées de fibres plastiques (formes ondulées et rectilignes) avec un taux de pourcentage d'addition en fibres allant de 0.3% à 1.2%.

Les résultats ont révélé que l'introduction des fibres plastiques influe négativement sur l'état frais des BAP, et améliorent considérablement la résistance à la traction et le module d'élasticité.

Mots clés : Béton Autoplaçant ; fibres plastique; Bétons autoplaçants renforcés de fibres; bétons frais et durcis ;

Abstract

This research focuses on the effects of strengthening self-compacting concrete with plastic fibers.

Three families of self-compacting concrete reinforced plastic fibers (corrugated and straight lines) with a rate of addition of fiber percentage ranging from 0.3% to 1.2%.

The results showed that the introduction of plastic fibers negatively affects fresh BAP, and significantly improve the tensile strength and modulus of elasticity.

Keywords: Self-Consolidating Concrete; plastic fibers; Compacting concrete reinforced with fibers; fresh and hardened concrete;

CHAPITRE I : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

Tableau I.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage…….14

Tableau I.2 : Critères de stabilité ……23

Tableau I.3 : Application des divers renforcements de fibres **[55], [58]**……47

Tableau I.4 : Applications de bétons renforcés de fibres……61

CHAPITRE II: MATERIAUX ET ESSAIS

Tableau II.1 : L'analyse chimique du ciment et composition du clinker……77

Tableau II.2: Compositions des différents BAPFPR étudiés dans 1 m^3 du béton……85

Tableau II.3: Compositions des différents BAPFPO étudiés dans 1 m^3 du béton……86

CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Tableau III.1 : Résultats obtenus sur les BAPFPR étudiés à l'état frais……...106

Tableau III.2 : Résultats obtenus sur le BAPT et les BAPFPO étudiés à l'état frais……107

Tableau III.3: Résultats obtenus sur le BAPT pour la compression et la traction……113

Tableau III.4: Résultats obtenus sur les BAPFPR pour la compression et la traction……..113

Tableau III.5: Résultats obtenus sur les BAPFPO pour la compression et la traction……..114

Tableau III.6: Résultats obtenus de module d'élasticité pour les trois types du béton…….118

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.01: Essai d'étalement (Slump flow)……..…….……16
Figure I.02: Essai d'entonnoir (V- Funnel)...…….……17
Figure I.03: Essai d'entonnoir « O- Funnel »…….……17
Figure I.04: Schématisation de l'essai de la boite en L (L-Box)……18
Figure I.05 : Essai J-Ring……....19
Figure I.06: Schématisation de l'essai du tube en U ……..……20
Figure I.07: Schématisation de l'essai du caisson……...…21
Figure I.08: Schématisation de l'essai de la passoire……..22
Figure I.09: Schématisation de l'essai de stabilité au tamis……23
Figure I.10: Essai de la colonne……...……24
Figure I.11: Dispositif de l'essai à la colonne LMDC……...……..25
Figure I.12 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)…...26
Figure I.13 : Phénomène de ressuage……..28
Figure I.14 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T=20°C, 50% HR)….29
Figure I.15 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres…….38
Figure I.16 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres……...……..39
Figure I.17: Quelques formes de fibres d'acier……...……...…….40
Figure I.18: Fibres de carbones……...……...…….41
Figure I.19 : fibres de verres……....42
Figure I.20 : Fibres d'Aramide hachées et en files…….……...……..42
Figure I.21: Fibres de polypropylène……..…….43
Figure I.22: Fibres végétales……44
Figure I.23 : Exemple de cycle de recyclage……...……..…..51
Figure I.24 : Matière plastique……...…..53
Figure I.25 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP **[82]**……..…….68
Figure I.26 : Deux types de palplanche……...……70
Figure I.27 : Exemple d'une voussoire ……..……...……..71
Figure I.28 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions, Alcantara 2004 **[86]**…….73
Figure I.29 : Comportement à la traction de différentes compositions, Pons et Al 2007 **[90]**……74

CHAPITRE II: MATERIAUX ET ESSAIS

Figure II.1 : Le ciment utilisé (Annexe A)……78
Figure II.2: Sable concassée ……79
Figure II.3: Sable Roulé……79
Figure II.4 : Gravier de Mont Guorno 3/8……..80
Figure II.5 : Gravier de Mont Guorno 8/15……...80
Figure II.6: Analyse granulométrique des sables……...80
Figure II.7: Analyse granulométrique des graviers……81
Figure II.8 : MEDAFLOW 145……82
Figure II.9 : Différentes formes de fibres utilisées……..82
Figure II.10 : Protocole de l'essai de La masse volumique pour les fibres plastique...……83
Figure II.11 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant témoin et fibré……88
Figure II.12 : Protocole de l'essai d'étalement……...…….89
Figure II.13 : Protocole de l'essai d'entonnoir (V-Funnel)……...……..90
Figure II.14 : Protocole de l'essai de stabilité au tamis……..…….92
Figure II.15 : Protocole de l'essai de la boîte de L-Box……..……93
Figure II.16 : Protocole de remplissage des moules…….……...93
Figure II.17 : Conservation des éprouvettes……..……..94
Figure II.18 : Presse hydraulique (2000 kN)……..…….95
Figure II.19 : Protocole de l'essai de compression……..96
Figure II.20 : Protocole de l'essai de traction par flexion……...……96
Figure II.21 : Le réctractomètre…….…..97
Figure II.22 : Protocole de l'essai de retrait……...……..…98
Figure II.23 : Protocole de l'essai de gonflement……99
Figure II.24 : Absorption d'eau par succion capillaire…….….101
Figure II.25 : L'essai du module d'élasticité……...…….…….102

CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Figure.III.1: L'étalement en fonction de facteur de fibre……..……..108
Figure.III.2: T_{500} en fonction de facteur de fibre……..108
Figure.III.3: L'affaissement homogène et contracté……....108
Figure.III.4a : T (V-Funnel) en fonction de facteur de fibre……..110
Figure.III.4b : T (V-Funnel) en fonction de facteur de fibre……..…110
Figure.III.5: Cas de blocage……...……..…110

Figure.III.6: Stabilité au tamis en fonction de facteur de fibre……..……..111
Fig.III.7. Teneur maximum en fibres……112
Figure.III.8: La résistance a la compression à 7 jours ……..……...114
Figure.III.9: La résistance a la compression à 28 jours…..…….……..115
Figure.III.10: La résistance a la compression à 90 jours **……..…….……...115**
Figure.III.11: La résistance a la compression à 28 jours pour le cylindre..……..115
Figure.III.12: La résistance a la traction à 7 jours……...……..117
Figure.III.13: La résistance a la traction à 28 jours……...……117
Figure.III.14: La résistance a la traction à 90 jours……...……....117
Figure.III.15: Module d'élasticité en fonction de facteur de fibre…...……119
Figure.III.16: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm…….119
Figure.III.17: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 40 mm…….120
Figure.III.18: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 50 mm…….…120
Figure.III.19: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 35 mm…….....120
Figure.III.20: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 40 mm…….121
Figure.III.21: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 50 mm…….121
Figure.III.22: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm…….…122
Figure.III.23: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm…….…122
Figure.III.24: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 50 mm…….…123
Figure.III.25: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 35 mm…….123
Figure.III.26: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 40 mm…….123
Figure.III.27: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 50 mm……...…..124
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 35 mm……...124
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 40 mm…...…125
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 50 mm……...125
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 35 mm…...…125
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 40 mm……...126
Figure.III.27: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 50 mm……...126

BAP : bétons autoplaçants

BAPF : bétons autoplaçants fibrés

BOF : bétons ordinaires fibrés

BO : bétons ordinaires

BV: bétons vibrés

BF : bétons de fibres

BRF : béton renforcé de fibres

BHP : bétons à hautes performances

BTHP : bétons à très hautes performances

BFM : bétons de fibres métalliques

BPR : bétons de poudre réactive

BAN : bétons autonivelants

BAPT : béton autoplaçant témoin sans fibres

BAPFPO : béton autoplaçant de fibres plastiques ondulées

BAPFPR: béton autoplaçant de fibres plastiques rectiligne

FS : fibre synthétiques

FM : fibres métalliques

K : clinker

S : laitier de haut fourneau

Z : pouzzolane naturelle

V : cendres volantes siliceuses

W : cendres volantes calciques

D : fumée de silice

L : calcaire

T : schistes calcinés

CPA-CEM I 42,5 : ciment Portland artificiel de classe une (1) et de résistance minimale à la compression à 28 jours égale à 42,5 MPa

CPA-CEM II/A et B 42,5 : ciment Portland artificiel de classe deux A ou deux B (2A ou 2B) et de résistance minimale à la compression à 28 jours égale à 42,5 MPa

CPJ-CEM II/B 42,5 : ciment Portland composé de classe deux B (2B) et de résistance minimale à la compression à 28 jours égale à 42,5 MPa

E/C : le rapport eau sur ciment

E/F : le rapport eau sur fines

L/D : le rapport longueur sur diamètre

S/G : le rapport sable sur granulats

R_{comp} : résistance à la compression

R_{trac} : résistance à la traction

R_{comp}/R_{trac} : rapports résistance à la compression sur résistance à la traction

PMS : polymère de mélamine sulfonate

PNS : polymère de naphtalène sulfonate

LS : lignosulfonates modifiés

PC : polycarboxylate

JSCE : Japanese Society of Civil Engineers

L_f : Longueur de la fibre

D_f : diamètre de la fibre

L_f/D_f : l'élancement

PAN : polyacrylonitrile

CET : coefficient d'expansion thermique

PITCH : fibre isotropique

HM : haut module d'élasticité

HR : haute résistance

PET : polyéthylène téréphtalate

EPDM : caoutchouc éthylène-propylène

SOMMAIRE

Remerciements

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations et abréviation

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : SYNTHESES BIBLIOGRAPHIQUES

I.1 LE BETON AUTOPLACANT 4

I.1.1 Introduction 4

I.1.2 Constituants d'un béton autoplaçant 8

I.1.2.1 Le Ciment 8

I.1.2.2 Les Granulats 8

I.1.2.3 l'eau 9

I.1.2.4 Les adjuvants 10

A. Les superplastifiants 10

B. L'agent colloïdal ou de viscosité 11

I.1.2.5 Les ajouts minéraux 12

I.1.3 Caractérisation d'un béton autoplaçant 13

I.1.3.1 caractéristiques à l'état frais 13

A. Capacité au remplissage 14

B. Capacité de passage 14

C. Résistance à la ségrégation 15

D. Rhéologie des BAP 15

I.1.3.2 Essais sur béton frais 15

A. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow) 16

B. Essai d'entonnoir (V-Funnel) 17

C. Essai de la boite en L (L-Box) 18

D. Essai de la couronne J (J-Ring) 19

E. Essai de l'écoulement au caisson 21

F. Essai de la passoire 22

G. Essai de stabilité au tamis 22

H. Essai de la colonne 23

I. Essai à la colonne LMDC 24

I.1.3.3 caractéristiques à l'état durci 25

A. Résistance à la compression 26

B. Resistance à la traction par flexion 27

C. Module de Déformation Longitudinal 27

D. Le retrait 28

D.1 Le Retrait Thermique (plastique) 29

D.2 Le Retrait Endogène ou d'Autodessiccation 29
D.3 Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation 30
D.4 Fluage 30

I.1.4 Formulations et Compositions des BAP 31
I.1.4.1 Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon) 31
I.1.4.2 Formulation LCPC (France) 33
I.1.4.3 formulation CBI modifiée 34
I.1.4.4 Formulation JSCE 34

I.1.5 Avantages et inconvénient d'un béton autoplaçant 35
I.1.5.1 Avantages d'un BAP 35
A. Pour la mise en œuvre 35
B. Sur la qualité du béton 36
C. Concernant la conception 36
I.1.5.2 inconvénient d'un BAP 36
A. Désavantages socio-économiques 36
B. Désavantage sur la qualité du béton 36

I.2 RENFORTS FIBREUX 37

I.2.1 Introduction 37

I.2.2 rôles de fibres 37

I.2.3 Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres 38

I.2.4 différents types de fibres utilisées 39
I.2.4.1 Les fibres métalliques 39
I.2.4.2 Les fibres minérales 40
A. Les fibres de carbone 40
B. Les fibres de verre 41
I.2.4.3 Les fibres organiques 42
A. Les fibres d'Aramide 42
B. Les fibres de polypropylène 43
I.2.4.4 les fibres végétales 43
A. Les Fibres de Feuilles 45
B. Les Fibres de Tiges 45
C. Les Fibres de Bois 45
D. Les Fibres de Surface 45
I.2.4.5 les fibres animales 46

I.2.5 Utilisation des fibres dans la construction 46

I.3 RECYCLAGE ET MATIERE PLASTIQUE 49

I.3.1 Définition 49

I.3.2 Principes du recyclage 49

I.3.3 Types de recyclage 50

I.3.4 Chaine de recyclage 50

I.3.4.1 Collecte de déchets 50

I.3.4.2 Transformation 51

I.3.4.3 Commercialisation et consommation 51

I.3.5 Impacts du recyclage sur l'environnement 52

I.3.6 Matière plastique 52

I.3.6.1 Introduction 52

I.3.6.2 définition 53

I.3.6.3 Type de matières plastiques 54

A. Les élastomères 54

B. Les thermodurcissables 54

C. Les thermoplastiques 55

I.3.6.4 Les propriétés des plastiques 55

A. Les principales propriétés mécaniques des plastiques 55

B. La résistance au choc des plastiques 55

C. Le comportement à la chaleur des plastiques 56

D. La tenue au vieillissement des plastiques 56

I.3.6.5 Le recyclage des plastiques 56

I.4 LES BETONS DE FIBRES 58

I.4.1 introduction 58

I .4.2 Définition de béton de fibres 58

I.4.3 Historique 60

I.4.4 Principe de renforcement. 60

I.4.5 Utilisation des bétons fibrés 60

I.4.6 Comportement Mécanique des bétons fibrés 62

I.4.6.1 Résistance a la compression 62

I.4.6.2 Resistance a la traction par flexion 63

I.4.6.3 Résistance au choc 63

I.4.6.4 Résistance à l'usure 63

I.4.6.5 Résistance aux agents extérieurs 63

I.4.7 La finition du béton fibré 64

I.4.8 formulation, fabrication et mise en œuvre 64

I.4.9 Durabilité des bétons de fibres 65

I.4.10 Avantages et inconvénients des B.R.F 65

I.5 BETONS AUTOPLACANTS FIBRES 67

I.5.1 introduction 67

I.5.2 Influence des fibres sur les propriétés a l'état frais 67

I.5.2.1 Effet sur l'étalement 68

I.5.2.2 Essai de V-funnel 69

I.5.2.3 Essai J-RING 69

I.5.2.4 Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique) 69

I.5.3 Orientation et distribution des fibres 70

I.5.4 Utilisation des BAP fibres dans les structures 70

I.5.4.1 Palplanches 70

I.5.4.2 Voussoirs 71

I.5.5 Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés 71

I.5.5.1 Comportement à la flexion 71

I.5.5.2 Comportement à la compression et à la traction 73

I.6 CONCLUSION 75

CHAPITRE II: MATERIAUX ET ESSAIS

II.1 INTRODUCTION 76

II.2 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES 77

II.2.1 Ciment 77

II.2.2 Granulats 78

II.2.2.1 Sable 78

A. Sable (0/3) 78

B. Sable roulé 78

II.2.2.2 Gravier 79

A. Gravier (3/8) 79

B. Gravier (8/15) 79

II.2.3 Eau de gâchage 81

II.2.4 Superplastifiant 81

II.2.5 Fibres plastique 82

II.3 LA FORMULATION DU BETON 83

II.4 TECHNIQUES EXPERIMENTALES 87

II.4.1 Séquence de malaxage du béton 87

II.4.2 Essais sur béton frais 88

II.4.2.1 Essais d'étalement et T50 88
A. Matériel nécessaire 88
B. Mode opératoire 88
II.4.2.2 Essai d'entonnoir en V (V-Funnel) 90
A. Matériel nécessaire 90
B. Mode opératoire 90
II.4.2.3 Essai de stabilité au tamis 91
A. Matériel nécessaire 91
B. Mode opératoire 91
II.4.2.4 Essai de la boîte en L (L-Box) 92

II.4.3 Remplissage des moules 93

II.4.4 Démoulage et conservation des éprouvettes 94

II.4.5 Essais sur Béton durci 94
II.4.5.1 Résistance à la compression 94
II.4.5.2 Résistance à la traction par flexion 96
II.4.5.3 Retrait et gonflement 97
A. Mesure des variations de longueur 97
B. Mesure des variations de masse 98
C. Expression des résultats 99
D. Conduite de l'essai 100
II.4.5.4 Absorption d'eau par capillarité 100
II.4.5.5 Le module d'élasticité : 101
A. Installation de l'étrier 101
B. Mode opératoire d'un essai 102

II.4.6 Récapitulation des essais faits à l'état frais 103

II.4.7 Récapitulation des essais faits à l'état durci 104

II.5 CONCLUSION 105

CHAPITRE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 INTRODUCTION 106

III.2 BETON FRAIS 106

III.2.1 Effet des fibres plastiques sur la valeur de T_{500} et l'étalement 107

III.2.2 le temps d'écoulement à travers le V-funnel 109

III.2.3 Capacité de Remplissage à travers le L –Box 110

III.2.4 stabilité au tamis 111

III.2.5 Teneur maximale en fibres 112

III.3 ESSAIS SUR UN BETON DURCI 113

III.3.1 résistance à la compression 113

III.3.2 résistance à la traction 116

III.3.3 module d'élasticité 118

III.3.4 retrait et gonflement 119

III.3.5 l'absorption d'eau 124

III.4 CONCLUSION 127

Conclusions générales et recommendations

Références bibliographiques

Annex.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire, il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en U ou en L)
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces trois caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point. Elle se caractérise par un volume de pâte (ciment + addition + eau + air) élevé, l'utilisation de superplastifiants et un volume de granulats faible.

En ce qui concerne la mise en place des bétons autoplaçants, celle-ci peut se faire comme pour les bétons ordinaires par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte ou d'un tube plongeur. Ce dernier permet d'éviter la chute du béton frais dans les coffrages.

Les bétons autoplaçants peuvent également être mis en place par le bas du coffrage à l'aide de manchettes d'injection. Le risque de formation de vides d'air est ainsi diminué.

Quelle que soit la méthode retenue pour mettre en place le béton, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages afin d'éviter le risque de voir se manifester de la ségrégation dynamique. Ainsi, il y a lieu de répartir les tubes plongeurs ou les manchettes d'injection à un espacement maximum de 7 mètres.

Depuis quelques années, il est question d'améliorer le comportement des BAP tendu par l'adjonction de fibres.

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons (ordinaires), l'incorporation des fibres dans le béton (béton ordinaire fibré) reste problématique du point de vue de l'ouvrabilité et de la répartition homogène des fibres.

Pour remédier à ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAPF) paraît prometteuse. En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente

maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité. L'absence de vibration de ces matériaux évite une distribution hétérogène des fibres dans la matrice.

Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres (BAP) soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs ont montré qu'il peut être une solution appropriée pour les applications sur poutres en I en béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration.

Quel peut être le rôle de ces fibres dans le comportement des BAP ?

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement.

Des fibres ont été ajoutées au mélange pour renforcer ses propriétés à l'état durci.

En revanche, les fibres peuvent, « aider » le béton dans les zones subissant des sollicitations moins sévères comme celles engendrées par le cisaillement d'effort tranchant.

Dans ces zones, la présence des fibres peut jouer deux rôles :

- retarder la fissuration du béton au-delà des conditions de service de la structure et ainsi éviter la mise en place d'armatures de type béton armé couteuses,
- une fois la fissuration amorcée, limiter son ouverture et préserver la durabilité, avec ou sans présence d'armatures transversales.

De nombreux types de fibres sont utilisés dans la construction. Elles peuvent être organiques, plastiques, métalliques, …etc. En fonction de leur nature, de leur forme et de l'application, elles peuvent être rigides ou souples.

De nombreuses recherches et les progrès associés ont eu lieu dans le domaine de la formulation, de l'amélioration des propriétés mécaniques, de l'allongement de la durée de vie et du calcul d'éléments constructifs ou de structures. Cependant, l'ajout de fibres, comme tout autre type d'inclusions, modifie les propriétés rhéologiques du matériau à l'état frais.

Pour que les fibres puissent être considérées comme armature de renfort homogène, il faut qu'au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, elles bloquent le développement prématuré de fissures intra granulaires; aussi il faut donc que la longueur de la fibre soit supérieure à la dimension du gros granulat (trois fois celle du granulat).

Les fibres courtes seraient contournées, voire elles mêmes source de rupture si la liaison fibre était de mauvaise qualité.

En outre, pour la teneur en fibres, toutes les études aboutissent à une conclusion: la diminution très nette de la maniabilité, lorsque la quantité de fibres dans un mélange augmente, la composition de la matrice est conservée.

Le mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique, il nous permet de savoir en plus les bétons autoplaçant, leur apparition, leur utilisation, leur formulation, les essais caractérisant les BAP et leurs avantages et inconvénients, les caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçant. Ainsi d'avoir des idées profondes concernant les fibres leur utilisation et l'effet des fibres sur la rhéologie des BAP, … etc.

Le deuxième chapitre est une revue de la méthodologie des essais, entre autre, c'est une présentation des essais qui sont réalisés dans laboratoire.

Le troisième chapitre est une interprétation des résultats des essais qu'on a cités dans le chapitre précédent.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 LE BETON AUTOPLACANT

I.1.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter le contexte général de la recherche, à savoir un bref historique sur les bétons autoplaçants depuis leur première confection au début des années 80, l'étendue de leur utilisation dans le monde ainsi que les avantages et les inconvénients de leur utilisation en Algérie. Une présentation des grandes parties de ce travail de recherche exposera les différentes étapes développées tout le long de ce mémoire.

Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Plusieurs types de bétons sont apparus ces dernières années ; les bétons ordinaires (BO), les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM), les bétons de poudre réactive (BPR) et les bétons autoplaçants et autonivelants (BAP et BAN).

Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faibles), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité

Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibrations. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire et ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques mis en œuvre par vibration d'où le qualificatif d'« autoplaçant » ou d‟'« autonivelant ».

Les BAP (SCC, self-compacting concrete) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier et le temps de mise en œuvre. Ce sont des bétons très spéciaux, ils sont

- très fluides et très déformables
- homogènes et stables
- ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration

- ils épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes.

Ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter des qualités comparables à celles des bétons vibrés classiques.

Le BAP est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène **[1]**.

Un BAP doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées , cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est à- dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un superplastifiant.

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des un particules solides et éviter de présenter ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage **[2]**.

Il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation **[3], [4]**. Très souvent, la satisfaction de ces deux exigences entraîne un compromis. Autrement dit, en plus de garantir un étalement compris entre 500 et 700 mm et d'assurer une très bonne capacité de remplissage.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés se caractérisent principalement par :

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement)
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage)

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point.

De nombreuses études actuelles ont pour objectif de trouver la bonne formulation des BAP, obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dont l'excès peut entraîner la ségrégation. Le faible ressuage des bétons autoplaçant présente, dans le cas des dallages, l'avantage de réduire le

temps entre la fin de la mise en œuvre et la fin de l'opération de finition du béton. Ces bétons offrent un grand nombre de possibilités très intéressantes dans de nombreux domaines comme :

- les dallages et les pieux
- la construction d'ouvrages d'art
- le renforcement et la réparation d'ouvrages d'art (application de couches minces dans des endroits difficiles d'accès)
- les bétons coulés sous l'eau et les bétons confinés
- les systèmes pour la stabilisation des déchets.

Les bétons autoplaçants connaissent un essor important au Japon, de part leurs deux principaux intérêts technico-économiques, à savoir :

La diminution du temps de travail et du nombre des ouvriers lors de la mise en place du béton sur chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais, étant donné la complexité croissante des coffrages (formes, ferraillages).

L'obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

L'intérêt des autres pays pour ces bétons n'est apparu que récemment, mais il est en plein augmentation, comme le montre la multiplication du nombre d'équipes de recherche dans ce domaine.
Cet intérêt tardif peut s'expliquer du fait que les chercheurs et les industriels japonais n'ont commencé à publier leurs recherches que depuis peu, étant maintenant dans une phase de valorisation de leur produit.

Les bétons autoplaçant se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ces propriétés particulières sont évaluées par différents tests d'étalement, de stabilité et de ressuage.

La formulation des bétons autoplaçant se distingue de celle des bétons ordinaires par une présence plus importante de volume de pâte (pâte = ciment + fines + eau + adjuvants), de manière à améliorer la fluidité du béton en évitant l'effet de voûte entre les gros granulats.

Les adjuvants peuvent être des superplastifiants hauts réducteurs d'eau et des agents colloïdaux. Les superplastifiants augmentent la maniabilité du béton, leur dosage est limité

pour éviter les risques de ségrégation et de ressuage. Les agents colloïdaux peuvent être utilisés pour limiter l'effet négatif des superplastifiants, ou plus généralement pour améliorer la stabilité des bétons fluides.

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton autoplaçant, alors qu'il existe des centaines de carrières qui produisent des milliers de tonnes de granulats calcaires concassés.

Notre recherche a pour but, l'utilisation de granulats concassés algériens dans la confection des bétons autoplaçant stables et durables. Ceci pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie.

Les bétons autoplaçants peuvent être utilisés dans plusieurs domaines, ils sont une solution bien adaptée pour :

- tous types de dalles y compris dalles de compression sur poutrelles hourdis
- radiers
- plancher dalle pleine et plancher chauffant
- rattrapage de niveau en rénovation
- fondations superficielles
- voiles, poteaux, poutres

Par ailleurs, et comme tous les matériaux, les BAP ont aussi des inconvénients.

- Le premier, celui qui est sans doute le plus discutable se trouve sur le plan économique.
- Les BAP sont très sensibles à la variation de leurs composants et particulièrement à quantité d'eau et de superplastifiants. Ils peuvent se dégrader de manière spectaculaire si l'eau est en trop grande quantité et perdre leurs caractéristiques d'autoplaçabilité si le dosage en superplastifiant est trop faible.
- Le grand problème à l'état durci persiste toujours qui est la faible résistance à la traction

I.1.2 Constituants d'un béton autoplaçant

I.1.2.1 Le Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% **[5]**. Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs**.**

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d"un ou de plusieurs ajouts.

Dans notre recherche Le ciment utilisé est un CPJ-CEM II/B, Un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de la farge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442].

I.1.2.2 Les Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Par ailleurs, le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour diminuer les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

L'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants a pu être mise en évidence de même qu'il est recommandé d'utiliser des granulats roulés. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation. Il est considéré que le volume des gros granulats, dans le béton, est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue, contrairement au rapport sable sur pâte qui lui n'influence pas sur le coefficient de remplissage. Le volume des gros granulats est donc limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 **[6].**

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1itre (L) dans un BAP.

Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le Dmax augmente **[7**]. Ainsi, le Dmax des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

Abib **[8]** a étudié l'effet de la variation de dimension du gravier sur l'ouvrabilité et la résistance des BAP. Il a conclue que le diamètre d'étalement d'un BAP augmente lorsqu'on diminue le volume de gravier de la fraction 8/16.

Bethmont **[9]** a explicité que la taille maximale Dmax des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente.

I.1.2.3 l'eau

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes **[10]** :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au delà de

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage.

Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (le rapport E/C rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants.

I.1.2.4 Les adjuvants

A. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation.

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées **[11]**.

Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années **[12]**.

Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante:

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS)
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS)
- Les lignosulfonates modifiés (LS)
- Les superplastifiants à base de polyacrylate, polycarboxylate (PC) ou de polyéthylène.

B. L'agent colloïdal ou de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton.

Autrement dit, Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage **[13]**.

Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges **[14]**.

Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré **[15]** qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croit avec celle de l'agent de viscosité.

Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraine une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure **[16]**.

I.1.2.5 Les ajouts minéraux

La plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des ajouts minéraux à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton, à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO2 de l'industrie cimentière dans la nature **[17]**.

Selon leurs activités avec le ciment ordinaire, les ajouts se divisent en ajouts pouzzolaniques qui réagissent et produisent d'autres hydrates et les fillers inertes qui ont un rôle de combler les interstices et diminuer la porosité **[18]**.

L'ouvrabilité du béton contenant des ajouts minéraux est largement améliorée par rapport au béton au ciment ordinaire. Cette amélioration est souvent attribuée à la grande finesse et à la caractéristique des surfaces de leurs grains qui crée des zones de glissement dans la pâte. En plus, la pâte de liant est augmentée par la présence d'un ajout plus léger ce qui engendre une faible cohésion entre les particules favorisant leur dispersion.

Les ajouts minéraux permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau **[18]**.

Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les ajouts minéraux réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire. Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d'où on trouve :

Les produits artificiels:

- le laitier des Hauts Fourneaux
- les cendres volantes,
- la fumée de silice,
- l'argile calcinée (méta kaolin)
- les déchets d'incinération
- les déchets de briques concassées

Les produits naturels:

- la pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
- le calcaire
- l'argile opaline
- les additions siliceuses (sable)

I.1.3 Caractérisation d'un béton autoplaçant

I.1.3.1 caractéristiques à l'état frais

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Les principales propriétés recherchées sur béton frais sont l'autocompaction, la fluidité, la viscosité et la stabilité envers la ségrégation. La formulation du BAP repose sur les mêmes bases technologiques que celles d'un béton vibré. Dans le cas du béton vibré, il s'agit de remplir les vides entre les granulats avec la pâte de ciment composée de ciment, d'additions et d'eau, afin d'obtenir un béton offrant les qualités requises (ouvrabilité et compacité).

Par contre dans le cas du BAP, la pâte de ciment doit non seulement remplir les vides intergranulaires, mais il faut en plus prévoir un volume excédentaire d'environ 65 à 100 l/m3. Dans le cas d'un mélange constitué exclusivement de granulats concassés, cette valeur peut même s'élever jusqu'à 100 à 120 l/m3. Cet excédent constitue une condition indispensable aux propriétés de fluidité exceptionnelles des BAP. Étant donné que le volume des vides du mélange varie en fonction de la nature et de la provenance des granulats, ceci peut entraîner des adaptations et modifications de la composition d'un BAP dans chaque cas particulier.

Les guides Européens pour le BAP **[19]**, répartissent les BAP à l'état frais en quatre (04) propriétés essentielles suivantes, et propose des essais à réaliser pour chacune d'elles :

- la Capacité au Remplissage
- la Capacité de Passage
- la Résistance à la Ségrégation
- Rhéologie

A. Capacité au remplissage

La capacité au remplissage du béton est définie comme l'habilité du béton à entreprendre un changement dans sa forme sous l'effet de son poids propre **[20]**, même dans le cas de présence d'obstacles qui peuvent interférer avec son écoulement. Cette capacité au remplissage peut être déterminée à l'aide de l'essai d'étalement (**Tableau I.1**).

Tableau I.1 : Essais permettant la détermination de la capacité de remplissage

propriété	Essai à réaliser
Capacité au remplissage	- Essai d'étalement (Slump flow) - Essai d'entonnoir (V-Funnel) - Etalement au cône d'Abrams en présence d'anneau de bars (J-Ring test) - Temps à T_{50} au cône d'Abrams (T_{50} Slump-Flow) - Essai du caisson (Fill Box) - Etalement au Tube Orimet (Orimet)

B. Capacité de passage

La capacité de passage décrit la capacité du mélange de béton frais à l'étalement à travers des espaces confinés sans ségrégation, sans perte d'uniformisation et sans blocage.

En définissant la capacité de passage, il est nécessaire de considérer, la géométrie et la densité du ferraillage, la capacité de remplissage du mélange ainsi que la dimension maximale du granulat.

La dimension à définir est l'espacement entre les bars, cet espacement doit permettre l'écoulement normal du béton. L'espacement entre la barre de ferraillage et le coffrage n'est pas à considérer car le béton peut contourner la barre et n'aura pas besoin de s'étaler continuellement à travers cet espace. La capacité de passage peut être déterminée à l'aide de, la boîte en L (L-Box) en mesurant la valeur H_2/H_1

C. Résistance à la ségrégation

La résistance à la ségrégation est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité sur site du béton autoplaçant. Le BAP peut souffrir de la ségrégation durant la mise en place et après mais avant son durcissement. La ségrégation qui se produit après la mise en place est la plus défavorable surtout pour les longs éléments et même pour les éléments minces comme les dalles, ça peut mener vers des dégradations de surface comme sa fissuration.

La résistance à la ségrégation devient un paramètre important dans le cas de classe élevée de fluidité ou de faible viscosité, ou bien dans le cas où les conditions de mise en place encouragent la ségrégation. Si aucun de ces cas ne se présente, il n'est généralement pas nécessaire de spécifier la classe de la résistance à la ségrégation. L'essai de la résistance à la ségrégation des BAP est l'essai au tamis de 5 mm.

D. Rhéologie des BAP

La rhéologie est une branche de la mécanique qui étudie l'écoulement des matériaux et l'interaction entre les états de sollicitations (contraintes) et les déformations, en fonction de leurs caractéristiques de viscosité, d'élasticité et de plasticité.

Comme certains matériaux ne répondent pas exactement à la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides, le vocable « rhéologie » a été inventée par des physiciens spécialistes de l'étude des matériaux dirigés par E.C. Bingham **[21]**. Entre le solide parfait et le liquide parfait newtonien, il est apparut nécessaire d'élaborer cette discipline nouvelle. L'intérêt de la rhéologie grandit chaque jour depuis son apparition en 1928 **[22]** avec l'apparition de nouvelles substances au comportement complexe tel que : pâtes, boues, suspensions, émulsions, polymères, etc. Pour le cas du béton, on s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable.

I.1.3.2 Essais sur béton frais

De nombreux tests simples et empiriques ont été mis au point dans le but de mieux caractériser le comportement du BAP et de valider son utilisation. Il existe actuellement presque autant de tests ou de version de tests que d'équipes de recherche qui ont étudié la question de caractérisation du BAP à l'état frais c'est-à-dire : la capacité au remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation.

A. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm (**Figure I.1**).

L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône, ainsi que le temps au passage à un diamètre de 50 cm.

Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton **[23]**.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette, accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le T_{50}, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de T_{50} traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le T_{50} est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général un temps de 2 à 5 s est acceptable pour obtenir un BAP **[23]**.

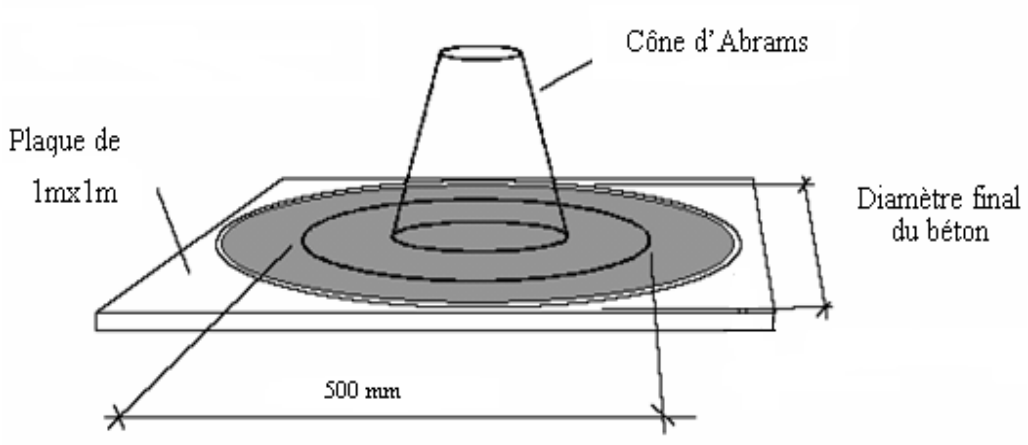


Figure I.01: Essai d'étalement (Slump flow)

B. Essai d'entonnoir (V-Funnel)

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en forme de V " V-Funnel " montré dans la (**Figure I.2**), ou parfois un entonnoir à section circulaire " O-Funnel " montré dans la (**Figure I.3**).

Le V-funnel est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue.

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

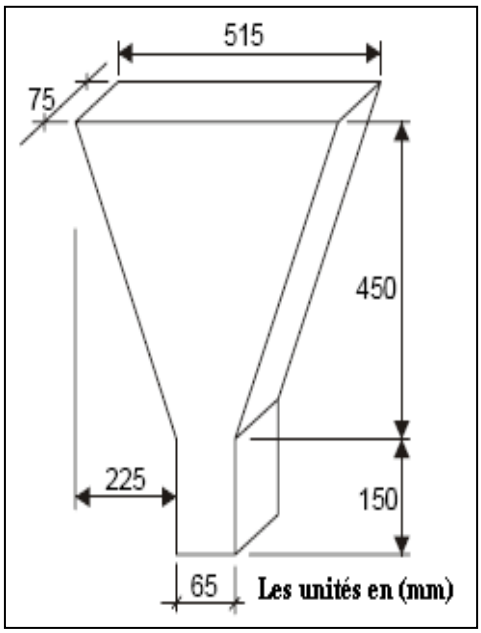


Figure I.02: Essai d'entonnoir (V- Funnel)

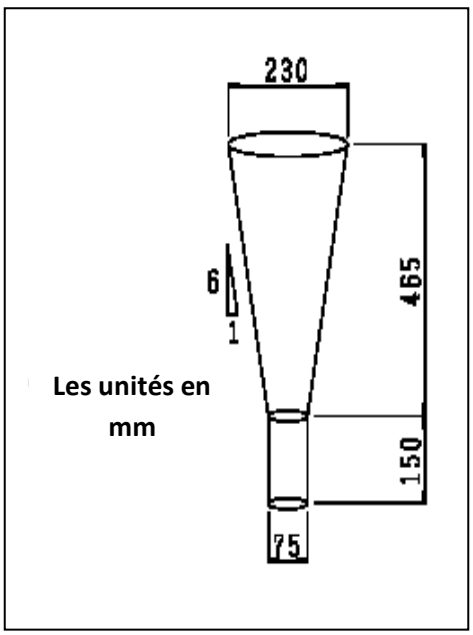


Figure I.03: Essai d'entonnoir (O- Funnel)

C. Essai de la boite en L (L-Box)

Cet essai permet de tester l'écoulement du béton à travers des armatures (capacité de passage), de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton. L'appareillage représenté par la (**Figure I.4**) consiste à laisser passer le béton du compartiment vertical au compartiment horizontal à travers l'espace entre armatures. Il existe des appareillages de différentes dimensions, ainsi que des armatures de différentes tailles et espacements, la **figure I.4** représente une boite en L dont les caractéristiques sont les suivantes :

- une hauteur totale de 60 cm
- une longueur de 70 cm
- une largeur de 20 cm

Un béton autoplaçant possède un taux de remplissage H_1/H_2 supérieur ou égal à 0.8 **[24]**. Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation.

La vitesse d'écoulement peut être évaluée en mesurant le temps de passage du béton à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm. Les temps de passages sont respectivement notés T_{20} et T_{40}. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour T_{20} et inférieures à 3.5 secondes pour T_{40} afin de rester dans un domaine autoplaçant.

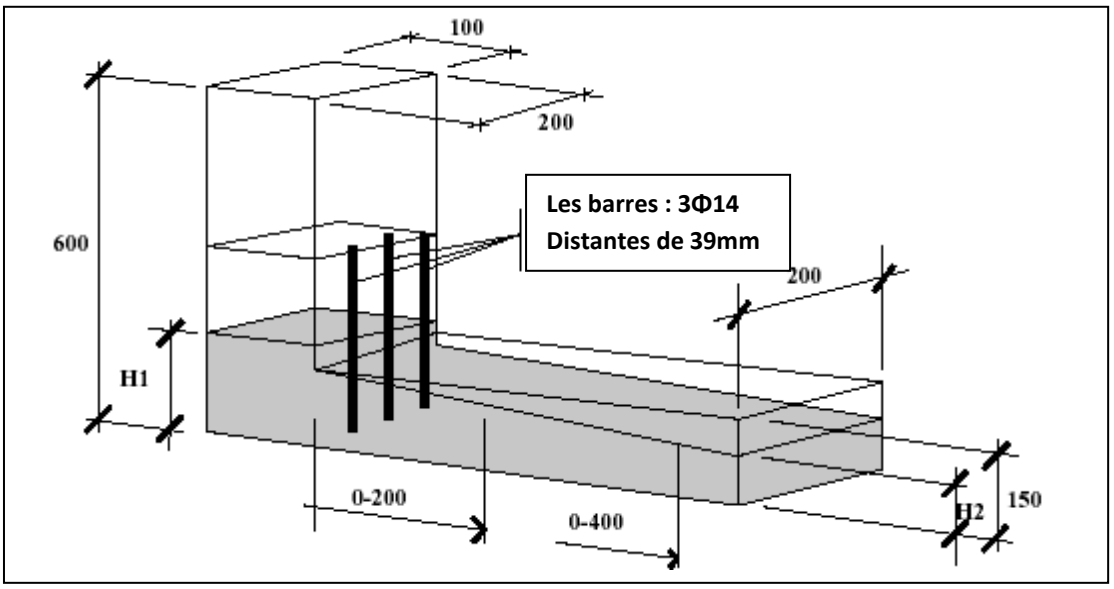


Figure I.04: Schématisation de l'essai de la boite en L (L-Box)

D. Essai de la couronne J (J-Ring)

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams (**Figure I.5**) sont centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures.

Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différentes selon les auteurs et les pays. Nous citons quelques dimensions rapportées par **[25]** : les diamètres des armatures et les espacements entre armatures peuvent varier respectivement dans les plages 10-16 mm et 34-48 mm. Le diamètre de l'anneau varie entre 23.5 et 30 cm. Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles.

Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la deuxième fois en utilisant l'anneau d'armatures.

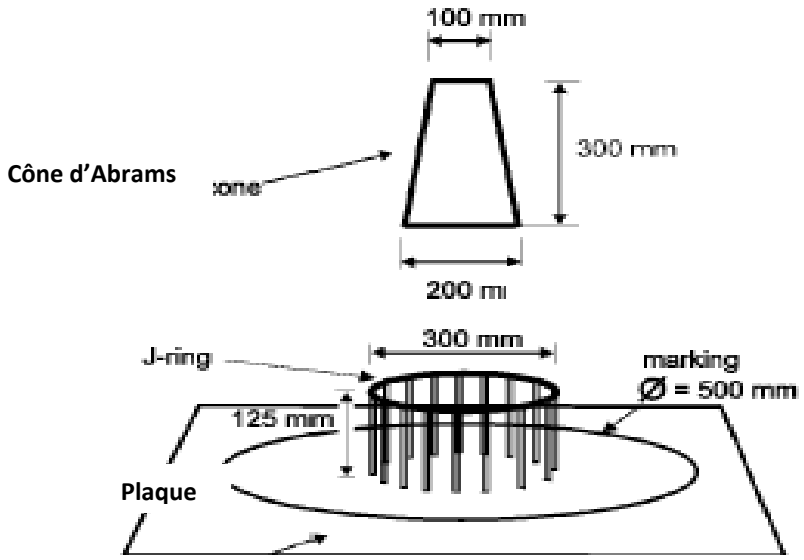


Figure I.05 : Essai J-Ring

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (**Figure I.6**) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante.

Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays).

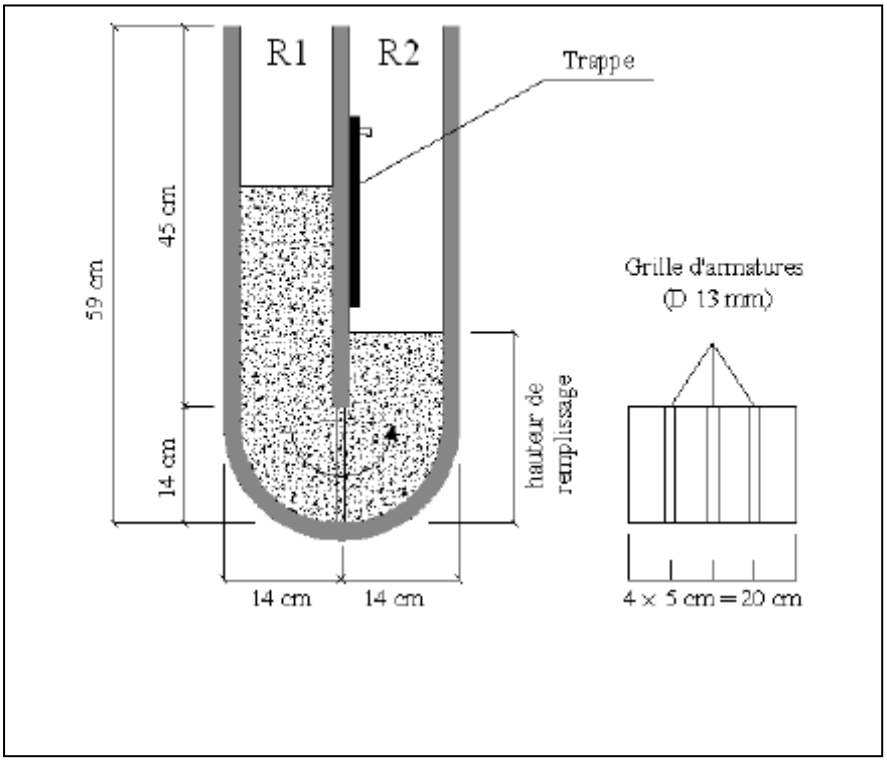


Figure I.06: Schématisation de l'essai du tube en U

Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint).

La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour le béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm **[25]**.

E. Essai de l'écoulement au caisson

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferraillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu (**Figure I.7**). Il est généralement destiné au test des bétons très fluides, ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton.

Ce test consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h_1 des armatures supérieures (**Figure I.7**). Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage. Une caractérisation quantitative du taux de remplissage R (%) est possible par la relation suivante : **[26]**

$$R(\%) = \frac{h_1+h_2}{2\times h_1} \times 100 \qquad \textbf{(I.1)}$$

Où h_1 et h_2 sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson (**Figure I.7**). Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% **[26]**.

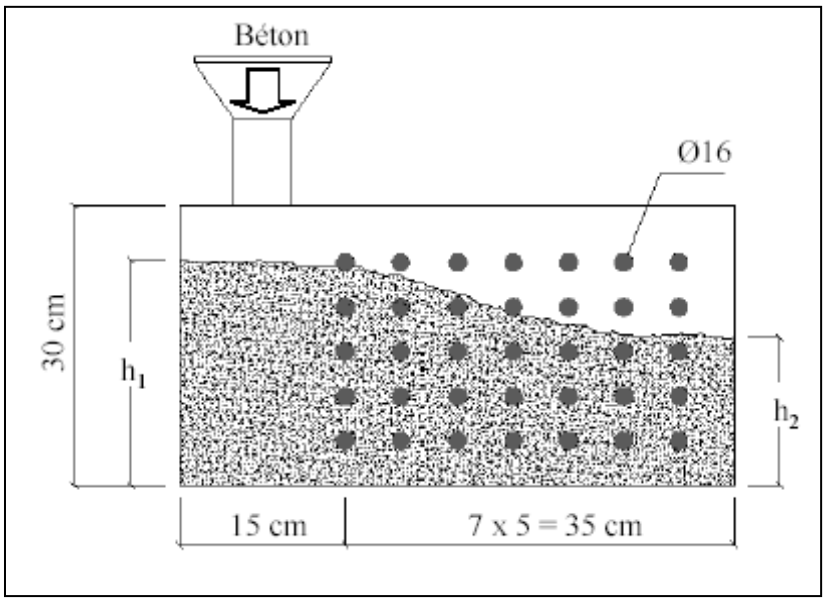


Figure I.07: Schématisation de l'essai du caisson

F. Essai de la passoire

Cet essai consiste à observer le comportement du béton pendant son écoulement à travers une grille d'armatures espacées de 5 cm. Il permet de détecter les signes de blocage afin d'évaluer la capacité de passage du béton.

Le test (**Figure I.8**) est réalisé avec un volume de 30 litres de béton, versé dans le récipient équipé dans sa partie inférieure de la grille d'armature. Le récipient est soulevé verticalement laissant le béton s'écouler à travers la grille. Une pression est exercée sur la surface supérieure de l'échantillon de béton afin de tester son comportement à différentes conditions d'écoulement (pression supérieure à celle de l'écoulement à l'essai au caisson) **[26]**.

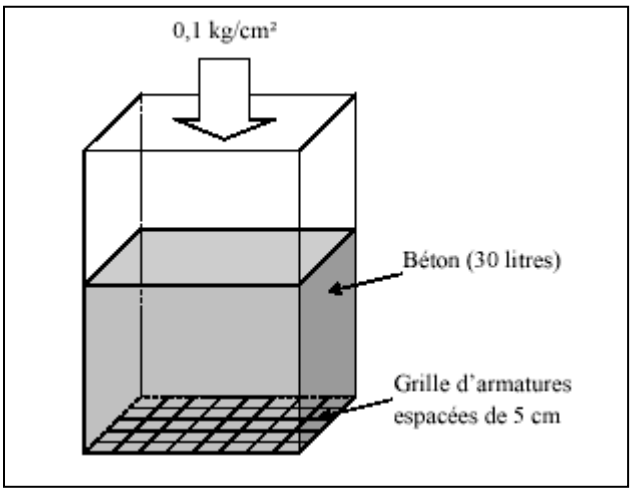


Figure I.08: Schématisation de l'essai de la passoire

G. Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai nécessite un seau de 10 litres avec couvercle, un tamis de 5 mm de maille, de diamètre 315 mm et un fond (**Figure I.9**). Le test consiste à remplir le seau de 10 litres, laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton (4,8 kg ± 0,2 kg) et versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis **[24]**. Le pourcentage (P) de la laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donc calculé [AFG00] :

$$P = \frac{\text{Masse de la laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}}.100 \qquad \textbf{(I.2)}$$

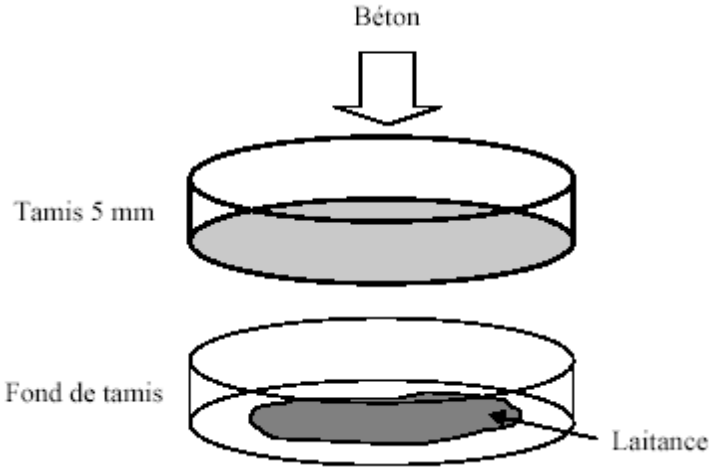


Figure I.09: Schématisation de l'essai de stabilité au tamis

La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante (**Tableau I.2**) **[24]**.

Tableau I.2 : Critères de stabilité

Conditions	Critères de stabilité	Remarques
$0\% \leq P \leq 15\%$	Stabilité satisfaisante	Béton homogène et stable
$15\% \leq P \leq 30\%$	Stabilité critique	Vérifier les autres critères d'ouvrabilité
$P \geq 30\%$	Stabilité très mauvaise	Ségrégation systématique, béton inutilisable

H. Essai de la colonne

Cet essai permet d'évaluer la résistance à la ségrégation d'un béton. Il consiste à placer le béton dans une colonne cylindrique (**Figure I.10**) ou à base carrée (10 cm de côté) et on le laisse jusqu'au début de prise. Des fractions des parties supérieures, centrales et inférieures sont lavées au travers d'un tamis de 5 mm et les granulats de taille supérieure à 5 mm sont pesés.

La ségrégation est négligeable si la distribution des granulats dans les différentes parties est uniforme. La distribution est considérée comme uniforme si la différence entre les teneurs en gravier des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10% **[27]**.d'autres auteurs considèrent une valeur de 5% pour le béton autoplaçant **[28]**.

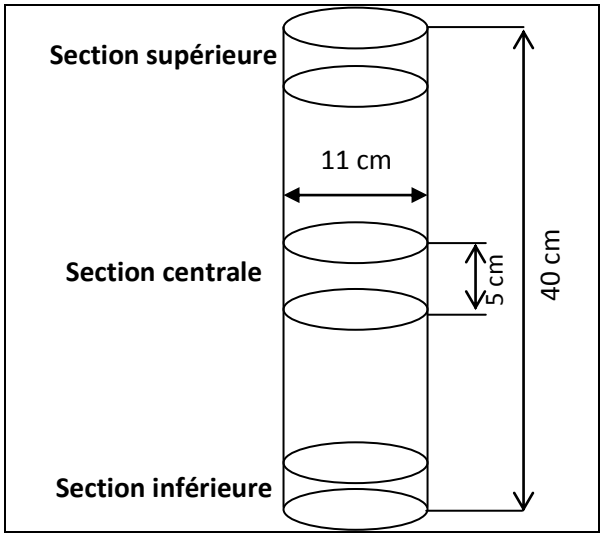


Figure I.10: Essai de la colonne

I. Essai à la colonne LMDC

C'est un essai qui permet de quantifier la ségrégation statique d'un béton autoplaçant à l'état frais. Le dispositif d'essai est constitué de 7 tiroirs en Bakélite, de section 15 cmx15cm, empilables les uns sur les autres pour former une colonne de 70 cm de hauteur. L'individualisation de chacun de ces tiroirs est possible par l'intermédiaire de tôles coulissantes (**Figure I.11**).

Il est alors possible de faire une analyse granulométrique du béton contenu dans chacun des tiroirs **[17] [29]**.

Le béton est versé dans la colonne dès la fin du malaxage. A l'échéance de 30 minutes après la mise en place dans la colonne, les tôles (**Figure I.11**) sont poussées pour séparer les 7 parties depuis le tiroir supérieur jusqu'au tiroir inférieur. Après lavage (sur un tamis de 2.5mm), une analyse granulométrique (à sec) est effectuée sur les squelettes granulaires récupérés dans chaque tiroir.

Cet essai est très bien corrélé avec l'essai de stabilité au tamis, et le complète. En effet il permet d'observer si la différence de granulométrie entre les parties supérieure et inférieure est graduelle ou brusque. De plus, on peut observer si l'éventuelle ségrégation se manifeste à partir d'une tranche granulaire donnée **[17].**

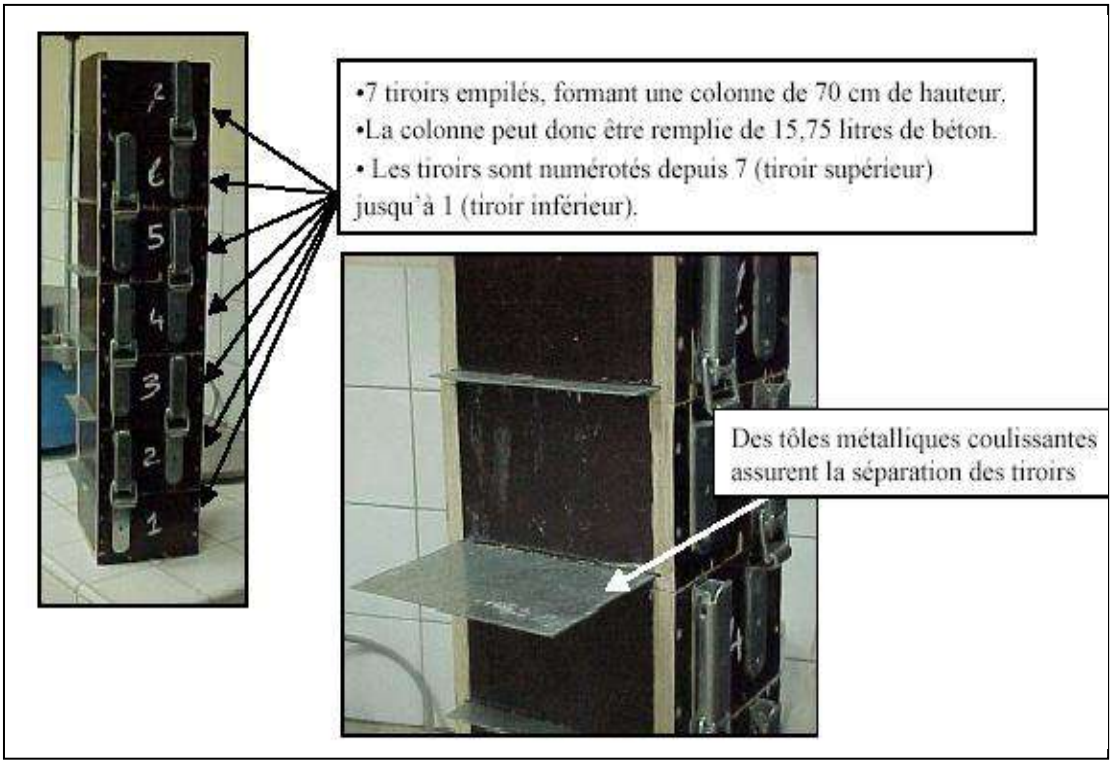


Figure I.11: Dispositif de l'essai à la colonne LMDC

I.1.3.3 caractéristiques à l'état durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois (voire des années), les propriétés mécaniques recherchées sont :

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées

A. Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques **[30].**L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges.

Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges.

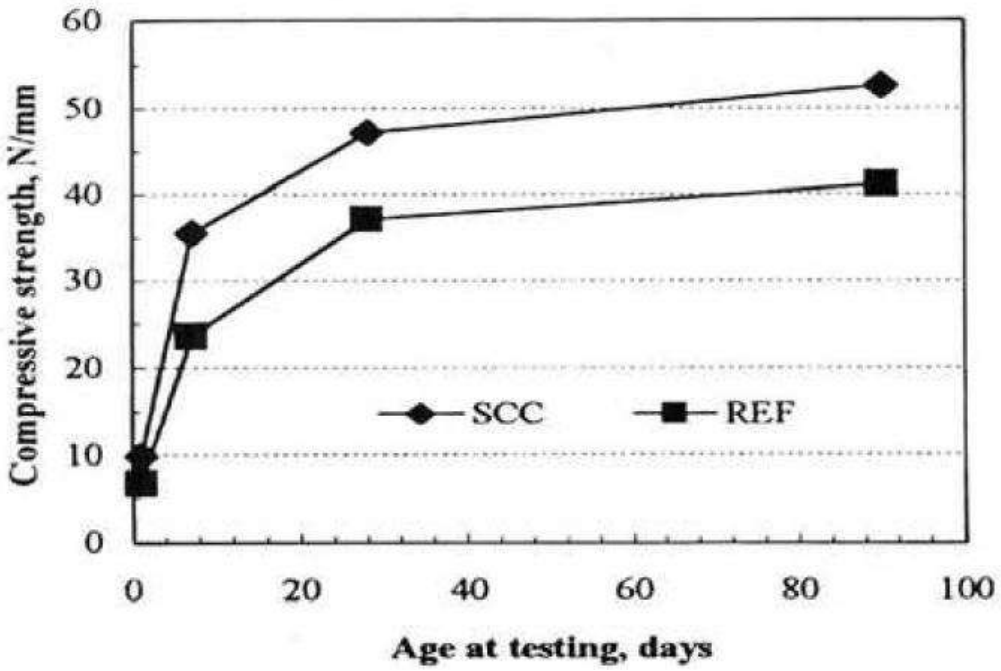


Figure I.12 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)

Ainsi, l'introduction Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. **[31]**

B. Resistance à la traction par flexion

Gibbs 99 ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, Gibbs 02 ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction. **[30]**

C. Module de Déformation Longitudinal

Comme la grande masse du volume de béton est représentée par les agrégats, le type et la quantité de ces derniers ainsi que les modules d'élasticité ont la plus grande influence sur le module d'élasticité du béton.

En choisissant des agrégats ayant un module élevé augmentera le module d'élasticité du béton. Par contre, un béton ayant un grand volume de pâte pourrait affaiblir la valeur du module d'élasticité du béton. Parce que les bétons autoplaçants ont un grand volume de pâte, leurs modules d'élasticités peuvent être, en quelque sorte, plus faibles que ceux des bétons ordinaires.

Assié et al **[32]** ont trouvé que, d'une part et malgré qu'avec un rapport E/C élevé, les BAP présentaient une meilleure résistance à la compression que les bétons ordinaires, d'autre part la quantité plus élevée de pâte dans les BAP a généré une réduction dans le module d'élasticité par rapport au béton ordinaire.

Nassif et al **[33]** attestent que le module d'élasticité est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression et que plus la résistance est élevée plus le module d'élasticité est élevé. Or ceci, d'après les auteurs, ne peut être valable que si le seul paramètre est le rapport eau/poudre.

Persson **[34]** avait trouvé que le module d'élasticité, le fluage et le retrait du BAP ne diffèrent pas significativement de celles du béton ordinaire quand la résistance est constante.

Felekoglu et al **[35]** ont montré que les mélanges de BAP ont des modules d'élasticité faibles comparés à ceux du béton traditionnel.

En général cette tendance peut être attribuée à la faible quantité de gros granulats et la grande quantité de la pâte.

D. Le retrait

Entre la fabrication et le début de prise, le béton ne présente pas de cohésion et se trouve en phase dite plastique. Pendant cette période, le béton subit une contraction de volume appelée premier retrait ou retrait plastique. Celui-ci est le résultat de plusieurs phénomènes chimiques ou physiques qui ont lieu dans un matériau en perpétuelle évolution.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire (**Figure I.13**).

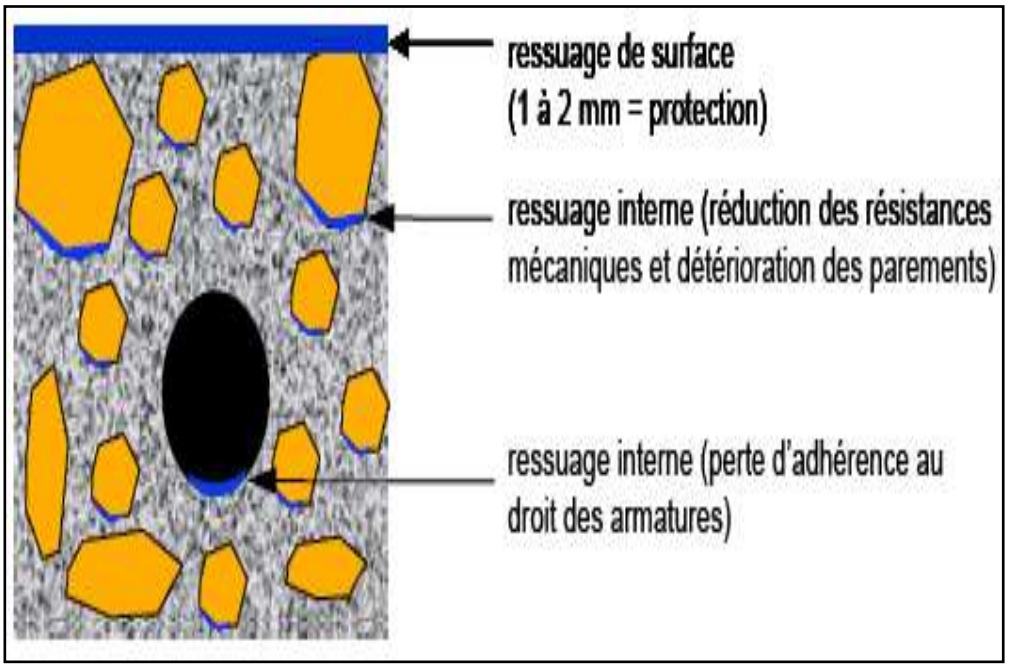


Figure I.13 : Phénomène de ressuage.

D.1 Le Retrait Thermique (plastique)

Plusieurs travaux ont comparé le retrait plastique du BAP et celui du béton vibré **[36.37]**. Gram et Piiparinen **[37]**, ont observé des retraits plastiques deux à trois fois plus grands pour les BAP que pour les bétons ordinaires (**Figure I.14**).
Pour Turcry **[36]**, l'amplitude maximale du retrait plastique des BAP est environ cinq fois supérieure à celle des bétons ordinaires.

Ces différences semblent pouvoir s'expliquer par deux paramètres de formulation qui changent d'un type de béton à l'autre : un rapport (E/F) plus faible pour les BAP et un dosage en superplastifiant des BAP plus fort qui retarde leur prise. Par conséquent, pour minimiser ce retrait plastique, il est préférable de choisir une addition dont la demande en eau est faible afin de limiter le dosage en superplastifiant. Selon Song et al **[39]**, le laitier rempli bien cette condition.

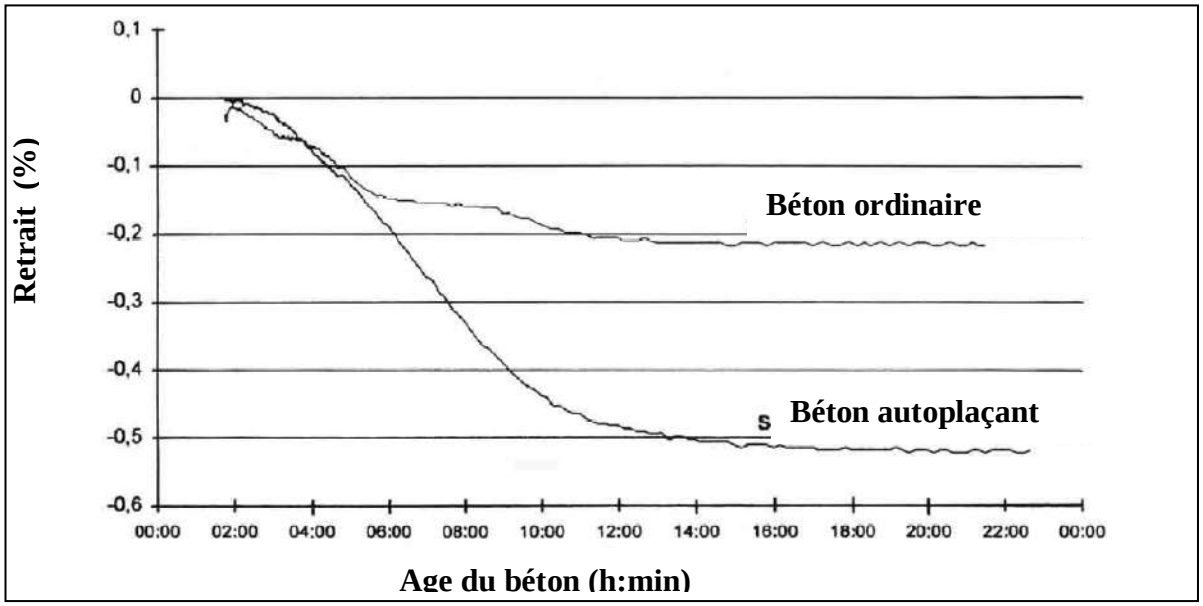


Figure I.14 : Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T=20°C, 50% HR).

D.2 Le Retrait Endogène ou d'Autodessiccation

L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique **[38]**.

D.3 Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation

Est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant **[39]**.

D.4 Fluage

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons.

Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. **[40]**

I.1.4 Formulations et Compositions des BAP

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage, etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis **[41]**.

Réaliser un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés des BAP.

Il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation.

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications.

I.1.4.1 Formulation OKAMURA ou "La Méthode Générale" (Japon)

Considérée comme la méthode générale de formulation, la formulation OKAMURA a été développée à l'Université de Tokyo par Okamura, d'après Ozawa et al rapporté par **[42]**.

Cette méthode consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances. Le principe de cette méthode est le suivant:

- La teneur volumique G en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide. Ce pourcentage permet d'éviter les risques de blocages, à condition que le mortier du béton réponde correctement aux critères d'ouvrabilité testés:

$$G = \frac{50}{100} G_{\lim} (1 - A) \qquad \textbf{(I.3)}$$

Où: A = quantité d'air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel

G_{lim} = volume absolu d'un mètre cube de gros agrégats

- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier:

$$S=\frac{40}{100}\frac{(1-A-G)}{1-K_{sf}} \qquad \textbf{(1.4)}$$

Où: K_{sf} = taux de fines particules (<0.09 mm) dans le sable

- L'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir en V) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux grandeurs: étalement relatif et vitesse relative d'écoulement.

La fluidité du mortier, donnée par:

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \qquad \textbf{(1.5)}$$

Avec d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône.

La viscosité du mortier, donnée par:

$$T = \frac{10}{t} \qquad \textbf{(1.6)}$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir en V exprimé en secondes.

Selon les auteurs, ces deux grandeurs représentent la fluidité (plus la valeur de D est élevées, plus le mortier est fluide) et la viscosité du mortier (plus la valeur de T est faible, plus la viscosité est élevée).

Le dosage du superplastifiant et le rapport E/C sont optimisés pour obtenir simultanément :

$$D = 5 \text{ et } T = 1 \pm 0{,}1$$

Le béton obtenu est testé pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, et le dosage du superplastifiant peut être réajusté si nécessaire pour obtenir un béton autoplaçant satisfaisant.

I.1.4.2 Formulation LCPC (France)

L'approche développée en France au LCPC par Sedran et De Larrard **[43]** est basée sur le modèle d'empilement compressible qui passe par l'optimisation de la porosité du système formé par les grains solides. Un arrangement optimal du squelette granulaire permet d'obtenir une meilleure résistance et une plus grande ouvrabilité. Le modèle permet de prévoir la compacité du squelette granulaire à partir des caractéristiques des constituants telles que la densité apparente, les proportions du mélange, les distributions granulaires et la compacité propre. Les auteurs ont modélisé le comportement à l'état frais du béton à partir de la compacité de son squelette granulaire.

Cette approche, basée sur la synthèse d'une quinzaine d'années de recherches, est simplifiée par la mise en œuvre d'un logiciel (Bétonlabpro 2) prenant en compte tous les paramètres de calcul de cette démarche **[44], [45]**, et permettant de déterminer des formulations de différents types de bétons (bétons à haute performance, bétons ordinaires, bétons secs pour démoulage immédiat, bétons autoplaçants).

Pour un béton autoplaçant, les grandeurs exigées à l'état frais sont

- un étalement au cône d'Abrams supérieur à 600 mm
- un seuil de cisaillement inférieur à 500 Pa
- une viscosité plastique comprise entre 100 et 200 Pa.s (grandeurs rhéologiques mesurées au BTHREOM).

Ces critères correspondent selon les auteurs à un béton assez fluide et qui ne présente pas de ségrégation.

Une proportion de liant (ciment + addition) est fixée à priori, pour laquelle on détermine le dosage à saturation du superplastifiant utilisé.

Selon l'expérience des auteurs, le dosage de saturation pourrait conférer au béton une viscosité élevée, par conséquent la moitié de ce dosage serait plus pertinente.

Le besoin en eau du liant en présence du superplastifiant est déterminé, et conduit au calcul de la compacité propre du liant, qui est une donnée d'entrée nécessaire. Grâce au logiciel, les dosages des constituants sont déterminés, en prenant en compte tous les paramètres de calcul, et de l'effet de paroi. Le dosage du superplastifiant peut être ajusté pour obtenir les critères d'ouvrabilité désirés, celui de l'eau pour obtenir la résistance à la compression ciblée.

I.1.4.3 Formulation CBI modifiée

La principale modification et extension de la méthode CBI est apportée par Bui et al dans **[46]**, qui ont proposé un critère supplémentaire pour obtenir un béton autoplaçant. Il s'agit d'ajouter un volume de pâte pour assurer un espacement minimal suffisant entre les granulats afin de réduire les frictions et les frottements entre les granulats. Leur méthode consiste à calculer l'épaisseur moyenne de la pâte autour des granulats du béton autoplaçant, grâce à une base de données importante de formulations de bétons **[47]**. L'espacement moyen entre les particules varie selon les auteurs entre 0,3 et 1 mm.

I.1.4.4 Formulation JSCE

La démarche proposée en 1998 par la Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques **[48]**. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont **[49]**:

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'autocompactibilité désirée. Il est situé entre 0.30 et 0.32 m^3/m^3 et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.
- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 kg/m^3 dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par m^3. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 kg/m^3.
- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume.
- Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en généra l0.13m^3/m^3. Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 m^3/m^3.

- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.
- La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air).
- Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de superplastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les superplastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par m^3, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

I.1.5 Avantages et inconvénient d'un béton autoplaçant

I.1.5.1 Avantages d'un BAP

Un BAP est donc un béton qui présente des caractéristiques rhéologiques telles qu'il se met en place sous son propre poids, en restant homogène, sans aucune vibration. Les avantages d'un tel béton sont les suivants

A. Pour la mise en œuvre

- suppression de la vibration et donc diminution notoire des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages
- diminution du temps de coulée
- meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes »
- possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles
- possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération

B. Sur la qualité du béton

- parfait remplissage des éléments fortement ferraillés
- obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface)
- et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages

C. Concernant la conception

- permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton
- possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage

I.1.5.2 inconvénient d'un BAP

Cependant, et malgré tout ce qu'on a vu comme avantages, les BAP possèdent quelque désavantages

A. Désavantages socio-économiques

- un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle
- Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées.les données de la littérature concernant les pressions exercées par les BAP sont parfois contradictoires mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre, de l'usure moindre des coffrages et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées.

B. Désavantage sur la qualité du béton

Le désavantage principal de ce béton est qu'il possède une faible résistance à la traction. Depuis quelques années, il est question d'améliorer le comportement des BAP tendu par l'adjonction de fibres.

I.2 RENFORTS FIBREUX

I.2.1 Introduction

Les fibres sont les renforts qui fournissent la résistance au matériau composite. Une fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5 µm et 25 µm suivant le type de fibres (métallique, verre, carbone, aramide, plastique…). Les exigences structurelles et fonctionnelles souhaitables des fibres dans les matériaux composites sont :

- un module d'élasticité élevé
- une haute résistance et une bonne élongation à la rupture en traction
- une bonne répartition des efforts entre les différentes fibres
- la stabilité des propriétés lors de la manipulation et la fabrication
- l'uniformité du diamètre des fibres et de la surface
- une dureté élevée
- la durabilité et un coût acceptable

Les fibres apportent au béton de nombreux avantages, notamment sur le comportement mécanique sous sollicitation de traction. Leur utilisation nécessite néanmoins la connaissance des mécanismes d'action ainsi que les précautions de mise en œuvre.

I.2.2 rôles de 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. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures (**Figure I.15**)
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (**Figure I.15**)

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.

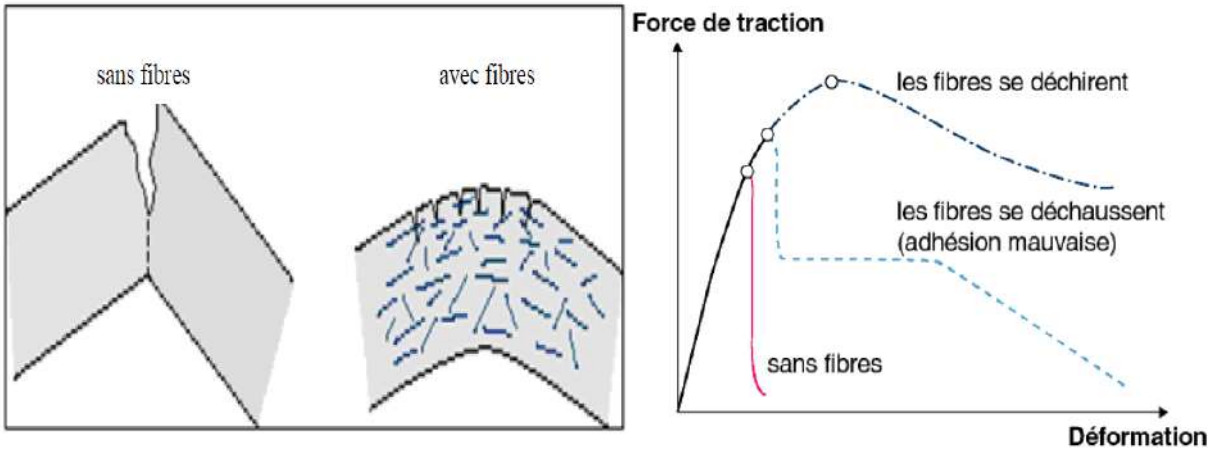


Figure I.15 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres

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

I.2.3 Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture. Les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres sont illustrés dans la (**Figure I.16**).

On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable.

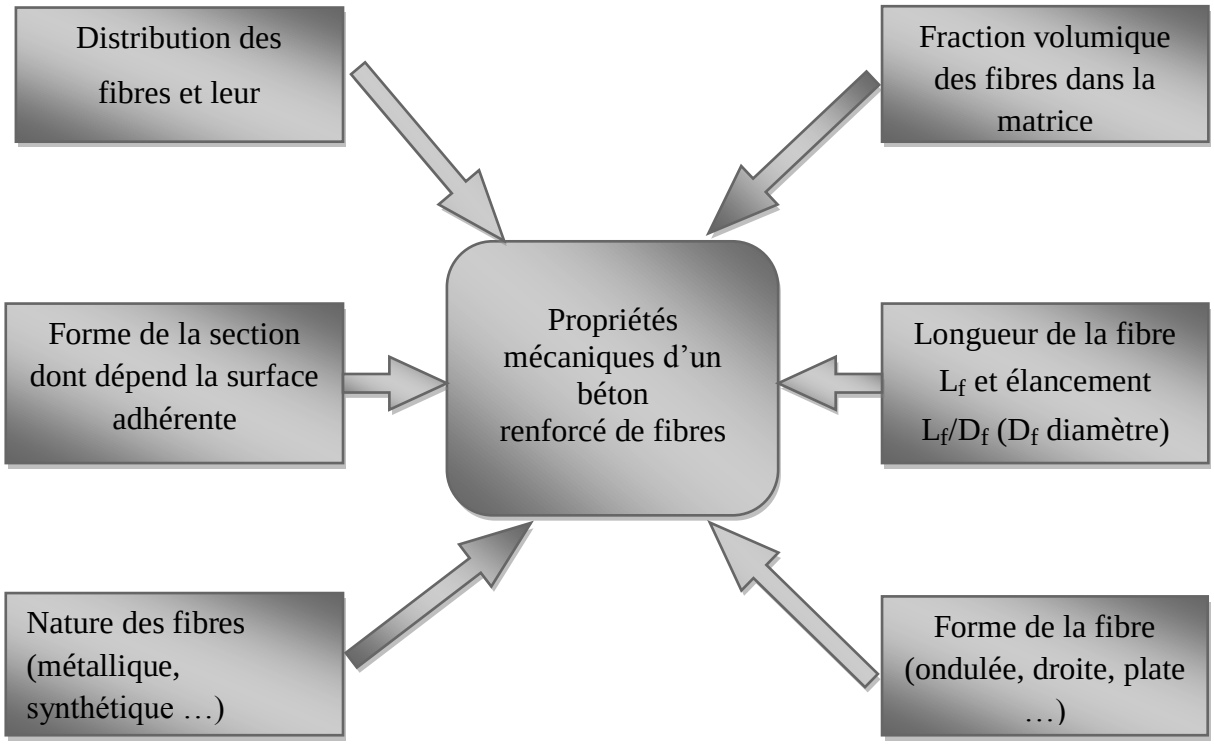


Figure I.16 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres

I.2.4 différents types de fibres utilisées

I.2.4.1 Les fibres métalliques

Les fibres métalliques (**Figure I.17**) sont largement utilisées et leurs effets sur les propriétés rhéologiques et à l'état durci aussi bien que sur la durabilité ont fait l'objet de nombreuses études **[50]**.

Les fibres d'acier sont sans doute les plus utilisées. Elles ont fait l'objet de plusieurs recherches. A l'origine, les fibres rectilignes et de section circulaire (d'un type identique à celles servant à armer les pneumatiques) ont évolués vers les fibres d'acier en tôle cisaillée.

Il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les uns des autres par

- leurs diamètres
- leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...)
- leur longueur et leur mode d'élaboration
- Elles peuvent être rectilignes, ondulées ou présenter des élargissements aux extrémités, soit des coudes ou des crochets pour améliorer l'adhérence.

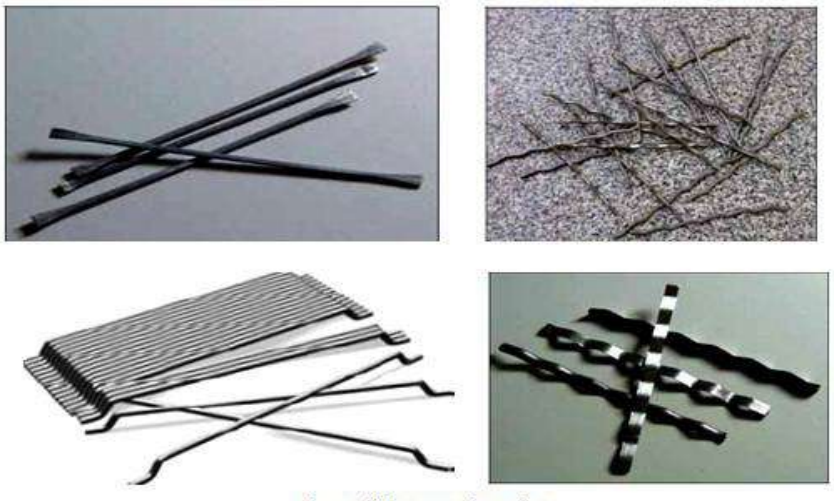


Figure I.17: Quelques formes de fibres d'acier

Il a été souligné que les fibres d'acier :

- augmentent considérablement la résistance à la traction du matériau, sa ténacité ou encore sa capacité d'absorption d'énergie
- elles réduisent en même temps la fissuration malgré le surpoids lié à leur masse volumique élevée.

Comme il existe d'autres types de fibres métalliques mais ne sont pas largement utilisées. Citons par exemple ; les fibres d'inox, les fibres de fontes, …etc.

I.2.4.2 Les fibres minérales

A. Les fibres de carbone

La plupart des fibres de carbone sont produites par la décomposition thermique du polyacrylonitrile (PAN). Le procédé de fabrication de ce type de fibre consiste à une oxydation à des températures de l'ordre 200-300°C, à différentes étapes de carbonisation (1000-1500°C et 1500-2000°C) et enfin à une graphitisation (2500-3000°C).

Les fibres (**Figure I.18**) de carbone sont caractérisées par

- haut module d'élasticité et haute résistance
- une rigidité spécifique (rapport rigidité/densité) élevée
- un faible coefficient d'expansion thermique (CET) longitudinal
- une faible sensibilité aux charges de fatigue
- une excellente résistance aux agents chimiques et à l'humidité
- Le module d'élasticité et la résistance des fibres de carbone sont stables lorsque la température augmente.

Cependant, les fibres de carbone ont une faible résistance à l'impact à cause de leur faible déformabilité et un coût élevé (10 à 30 fois plus que le verre-E). Ce coût élevé provient du prix élevé des matières premières et de la complexité du processus de la carbonisation et de la graphitisation.

Les fibres de carbone peuvent être classées comme suit :

Selon le type de précurseur :

- Fibres isotropiques "PITCH" caractérisées par un module élastique élevé.
- Fibres polyacrilonitrile "PAN" caractérisées par une résistance ultime et un coût très élevés.

Selon les propriétés physiques et mécaniques :

- Module élastique élevé (HM).
- Haute résistance (HR).



Figure I.18: Fibres de carbones

B. Les fibres de verre

Les fibres de verre (**Figure I.19**), par leurs qualités mécaniques et leur coût modéré, ont été les premières fibres artificielles utilisées dans les matériaux de construction. Cependant, les applications sont limitées en raison de leur faible résistance chimique aux alcalins De plus, des chercheurs ont démontré que l'introduction de fibres en faible quantité ne modifie pas de manière significative la performance mécanique mais peut, par contre, contrôler la fissuration due au retrait de dessiccation à jeune âge. Les mêmes effets ont été aussi observés lorsque les fibres synthétiques sont utilisées.

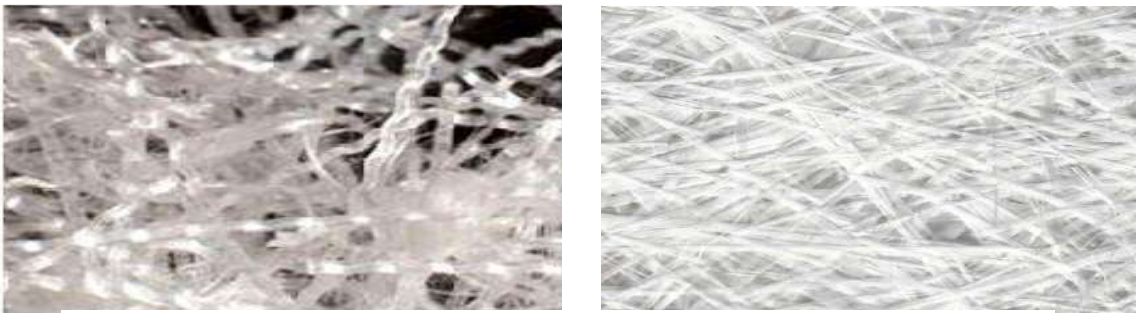


Figure I.19 : Fibres de verres

I.2.4.3 Les fibres organiques

A. Les fibres d'Aramide

Aramide est un terme générique pour un groupe de fibres organiques de faible densité et résistances spécifiques (rapport résistance en traction / densité) parmi les plus élevées parmi les fibres de renfort courantes. Les fibres d'aramide (**Figure I.20**) sont caractérisées par

- une haute résistance
- une rigidité élevée
- une stabilité vis-à-vis des hautes températures

La température d'utilisation typique pour les fibres d'aramide varie entre -200°C et +200°C. Trois types de fibres d'aramide sont commercialement disponibles portant les marques de fabricants telles que :

- Kevlar (Dupont, USA)
- Twaron (Akzo, Pays-Bas)
- Technora (Teijin, Japon)

Ces fibres sont résistantes à de nombreux produits chimiques, mais elles peuvent être dégradées par certains acides et alcalins.



Figure I.20 : Fibres d'Aramide hachées et en files

B. Les fibres de polypropylène

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques). Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté). Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).



Figure I.21: Fibres de polypropylène

I.2.4.4 les fibres végétales

Les fibres végétales sont composées principalement de la cellulose qui est un polymère naturel. Ces fibres sont caractérisées par leurs propriétés mécaniques intéressantes ainsi que leur faible densité ce qui permet la fabrication de bétons à la fois légers et performants.

En outre, ces fibres ne souffrent pas les problèmes de corrosion contrairement aux fibres métalliques et elles résistent durablement aux attaques chimiques des alcalins contrairement aux fibres de verre.

L'utilisation de fibres naturelles (**Figure I.22**), et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages

- ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles
- la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO2 et demandant peu d'énergie pour être produites.

Dans les pays peu industrialisés, les fibres végétales constituent donc une alternative à faible coût économique et surtout écologique aux fibres synthétiques conventionnelles (fibres métalliques, minérales ou polymériques).

Les études relatives aux bétons ainsi renforcés avec ces fibres ont montré que lorsqu'elles sont introduites dans les compositions à des dosages optimums (en fonction de leurs formes et leur nature), elles réduisent la fissuration liée au retrait plastique à jeune âge tout en augmentent la résistance mécanique des matériaux.

Il est possible de combiner deux ou plusieurs types de fibres dans le béton afin d'avoir un maximum de synergie en terme de résistance à la flexion et au retrait. Ainsi, la combinaison de fibres métalliques avec des fibres en polypropylène, conduit à une augmentation très significative des performances en matière de ténacité, de résistance à la flexion ainsi qu'à une réduction de retrait.



Figure I.22: Fibres végétales

Classification des fibres végétales

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

A. Les Fibres de Feuilles

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, de Henequen et d'abaca **[51]**. De ces fait, plusieurs chercheurs tel que : NILSSON **[52]**, AYYAR et al **[53]** ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

B. Les Fibres de Tiges

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sunn, de kennaf, de urena et de chanvre **[54]**. NILSSON **[52]** rapporte que les fibres de tige, les plus utilisées dans le renforcement du ciment, sont celles de sunn, de chanvre et de jute.

C. Les Fibres de Bois

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs **[51], [55]** ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

D. Les Fibres de Surface

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le coton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre **[56]**. Il est à noter que, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

I.2.4.5 les fibres animales

Pour les fibres animales, on peut trouver

- fibres de poil
- fibres de laine
- fibres de soie

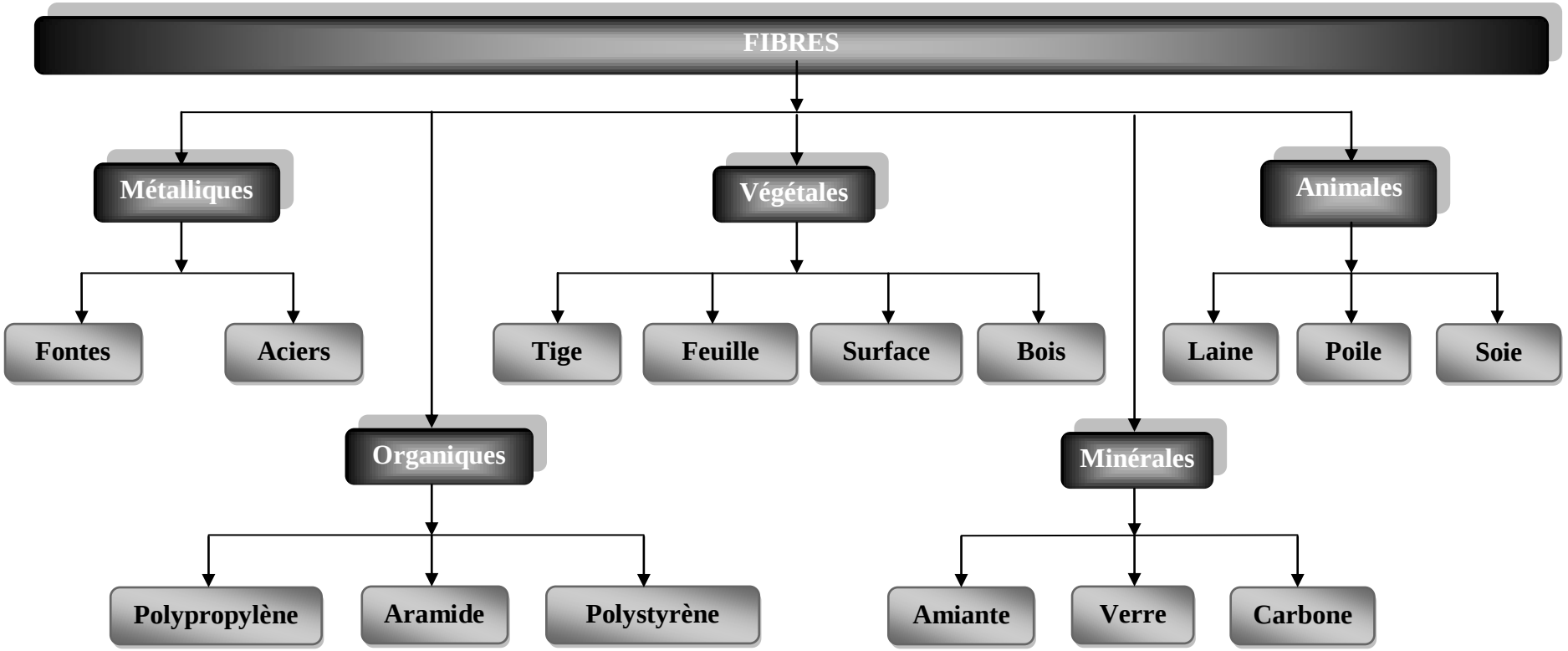
I.2.5 Utilisation des fibres dans la construction

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques et physiques. A titre d'exemple le (**Tableau I.3**) résume les diverses applications des fibres dans les produits cimentaires. L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, beaucoup de recherches sont en cours dans le but d'arriver à substituer les fibres d'amiante par les fibres végétales. Actuellement, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles et la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre **[57]**.

Par ailleurs, l'utilisation des fibres de polymère, de carbone et d'acier est de plus en plus pratiquée dans plusieurs domaines et spécialement dans la fabrication des panneaux et dans la restauration et la réparation des ouvrages anciens endommagés. **L'organigramme I.1** résume les différents types de fibres.

Tableau I.3 : Application des divers renforcements de fibres **[55], [58]**

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, rideaux, tuyaux d'égout, toiture en Voile mince, enduit
Acier	Elément de toitures en béton cellulaire, linteau, revêtement de chaussée, tabliers de pont, produit réfractaire, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
Polypropylène nylon	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquage et amarres pour les marinas, réparation des routes, tuyau sous marin, travaux de restauration bâtiments.
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, tuyaux d'égouts plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs.
Carbone	Elément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques, plancher d'échafaudage.
Particules de mica	Panneaux, tuyaux, travaux de restauration
Végétale	Dalles, tuiles.



Organigramme I.1 : Les différents types de fibres

I.3 RECYCLAGE ET MATIERE PLASTIQUE

I.3.1 Définition

Une idée relativement récente consiste à considérer les déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser. Traiter les déchets comme des matières premières devient de plus en plus courant, en particulier dans les agglomérations où l'espace pour ouvrir de nouvelles décharges se raréfie.

Le recyclage est un procédé par lequel les matériaux qui composent un produit en fin de vie (généralement des déchets industriels ou ménagers) sont réutilisés en tout ou en partie. Pour la plupart des gens dans les pays développés, le recyclage regroupe la récupération et la réutilisation des divers déchets ménagers. Ceux-ci sont collectés et triés en différentes catégories pour que les matières premières qui les composent soient réutilisées.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures :

- La réduction du volume de déchets, et donc de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles, pour se dégrader)
- La préservation des ressources naturelles, puisque la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 1970, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés

I.3.2 Principes du recyclage

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des (trois R) c'est-à-dire

- Réduire ; regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchets
- Réutiliser ; regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent
- Recycler ; désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

I.3.3 Types de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants
- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

I.3.4 Chaine de recyclage

I.3.4.1 Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence.

La collecte sélective, dite aussi « séparative » et souvent appelée à tort « tri sélectif » est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui jette le déchet le trie lui-même.

À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Un tri manuel, par des opérateurs devant un tapis roulant, complète souvent ces opérations automatiques. Avant ce stade, le verre brisé est systématiquement écarté pour éviter les risques de blessure.

I.3.4.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi

I.3.4.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs. En fin de vie, ces produits seront probablement jetés, et certains d'entre eux pourront être à nouveau récupérés et recyclés (**Figure I.23**).

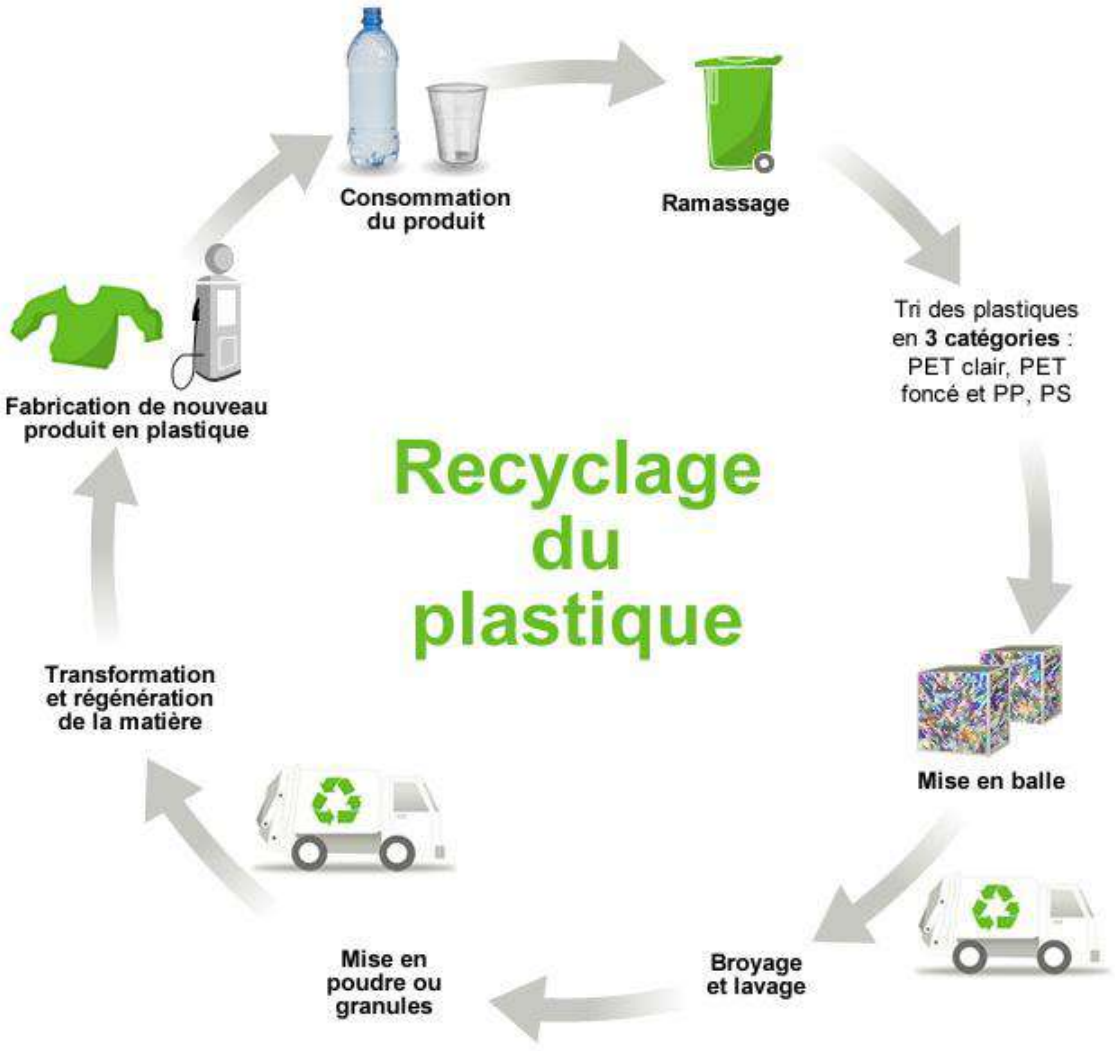


Figure I.23 : Exemple de cycle de recyclage

I.3.5 Impacts du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande **[59]**.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu)
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15g de bois.

I.3.6 Matière plastique

I.3.6.1 Introduction

Les matières plastiques ont envahi notre quotidien et il est difficile aujourd'hui de leur échapper. Symbole fort de la société de consommation, les matières plastiques sont considérées comme un matériau peu valorisant. Les consommateurs l'assimilent à un produit « jetable ». Pourtant, il devient impératif de réagir car elles représentent plus de 10 % de la masse totale des ordures ménagères.

Les bouteilles plastiques par exemple, sont difficilement décomposées par les micro-organismes : imputrescibles, elles ne sont pas biodégradables. Ces propriétés sont, à terme, une cause de pollution durable. Le recyclage ou leur traitement est donc impératif.

Le polyéthylène téréphtalate (PET) , est utilisé principalement pour les emballages de boisson. Comme tous les plastiques, le PET est produit à partir de pétrole. Il a remplacé progressivement le verre grâce à sa légèreté et sa résistance aux chocs.

I.3.6.2 définition

Les matières plastiques sont des matériaux organiques composés de macromolécules, elles sont produites selon un processus de fabrication entièrement ou partiellement synthétique et transformées en objets utilisables par le biais du façonnage plastique (**Figure I.24**).

En d'autres termes, cela signifie:

- que les matières plastiques sont issues de matériau organique (le pétrole par ex.)
- qu'elles se composent de macromolécules (dérivé de «macro» qui signifie grand). Il s'agit véritablement de molécules géantes. Dans tous les autres objets et matières, les molécules sont disposées les unes au-dessous, au-dessus et à côté des autres, dans le cas des matières plastiques, elles forment de longues chaînes ou réseaux
- qu'elles sont fabriquées selon un processus chimique de synthèse (composition de nouvelles matières à partir d'éléments ou liaisons simples, la cellulose par ex.)
- et qu'elles sont transformées en matériaux utilisables au moyen du façonnage plastique («plastique » est dérivé du mot grec ancien ; « plasticos» signifiant pâteux, malléable et façonné en une forme donnée).



Figure I.24 : Matière plastique

I.3.6.3 Type de matières plastiques

On peut classer la centaine de matières plastiques de différentes manières, par exemple en fonction de leur origine ou de leur parenté chimique.

Sur la base de leur structure, on dist²ingue trois types

- les élastomères
- les thermodurcissables
- les thermoplastiques.

A. Les élastomères

Il s'agit du nom générique de tous les types de caoutchouc et matériaux caoutchouteux. Les caoutchoucs sont dans l'ensemble assez souples et servent donc à la confection de tuyaux flexibles. Les élastomères sont très utiles comme éléments de conduites et structures: garnitures, joints d'étanchéité, joints toriques et autres comme l'EPDM (caoutchouc éthylène-propylène).

B. Les thermodurcissables

Ce terme est, lui aussi, dérivé du grec ancien «thermos» qui signifie chaleur. Les matières plastiques thermodurcissables durcissent donc après échauffement.

Dans la définition des matières plastiques, nous disions qu'un façonnage plastique se produit à tout le moins une fois. Et telle est la propriété des thermodurcissables: lors du façonnage, ils ramollissent, deviennent parfois presque liquides, et sont mis en forme; après refroidissement, cette forme devient rigide et assez dure.

Autre caractéristique: après tout échauffement ultérieur, ils ne peuvent plus être rendus malléables.

Vous aurez tout de suite compris qu'en matière de tuyaux, les matières plastiques thermodurcissables ne sont pas vraiment appropriées. Elles sont toutefois utilisées comme conduites de refoulement dans le secteur chimique, qui exigent non seulement une résistance chimique élevée mais également une bonne résistance à la pression.

Ces derniers sont, à diamètre supérieur, meilleur marché. Les tuyaux thermodurcissables sont donc fabriqués sous la forme de tuyaux plastiques armés. L'armature se compose généralement de fibres de verre et de fibres de verre tissées.

C. Les thermoplastiques

Ce sont, de loin, les matières plastiques les plus intéressantes pour l'installateur. Les thermoplastiques ramollissent après chaque échauffement et durcissent après chaque refroidissement. Ils sont d'autant plus durs que leur température est faible; certains sont même aussi cassants que le verre.

A l'état malléable, on peut les façonner à moindre frais et moindre effort; il suffi t de les laisser refroidir dans la forme voulue pour qu'ils la conservent.

Si on les chauffe une nouvelle fois, ils reprennent automatiquement leur état initial. On parle de «mémoire» des matières thermoplastiques.

C'est intentionnellement que nous avons fait allusion au verre. Il n'existe cependant aucune matière plastique aussi cassante que le verre à température normale. Ne vous y trompez donc pas. Mais lors de la transition de l'état dur à l'état très malléable, par échauffement, le matériau passe par une phase dite de vitrification, ou phase de transition verre/caoutchouc.

Les thermoplastiques ne fondent pas à proprement parler comme les métaux. On ne peut donc pas les couler. On obtient tout au plus un état de caoutchouc mou, stade auquel certains thermoplastiques se décomposent déjà.

I.3.6.4 Les propriétés des plastiques

Les propriétés des plastiques sont étroitement liées à leur structure chimique et à leurs adjuvants, ils ont cependant ceci en commun qu'ils sont tous de bons isolants électriques.

A. Les principales propriétés mécaniques des plastiques

La résistance à la traction et à la compression ainsi que la dureté dépendent essentiellement de la nature de la cohésion entre les chaînes de polymères.

B. La résistance au choc des plastiques

La résistance au choc est liée non seulement à la cohésion intermoléculaire, mais aussi à la dissipation de l'énergie dans le matériau (un plastique mou est moins cassant qu'un plastique dur), et l'incorporation de microgranules d'élastomères dans le polystyrène, par exemple, rend cette matière très résistante aux chocs.

C. Le comportement à la chaleur des plastiques

Le comportement à la chaleur dépend des températures auxquelles les liaisons intermoléculaires se rompent (phénomène analogue à la fusion). Un thermoplastique passe en général par trois états successifs quand la température s'élève:

- état rigide proprement dit (vitreux)
- état flexible, ou caoutchoutique, au-delà de la transition vitreuse
- et, enfin, état plus ou moins pâteux au-delà d'une température de fusion franche ou étalée.

Une basse température de transition vitreuse assure une bonne résistance au choc à froid.

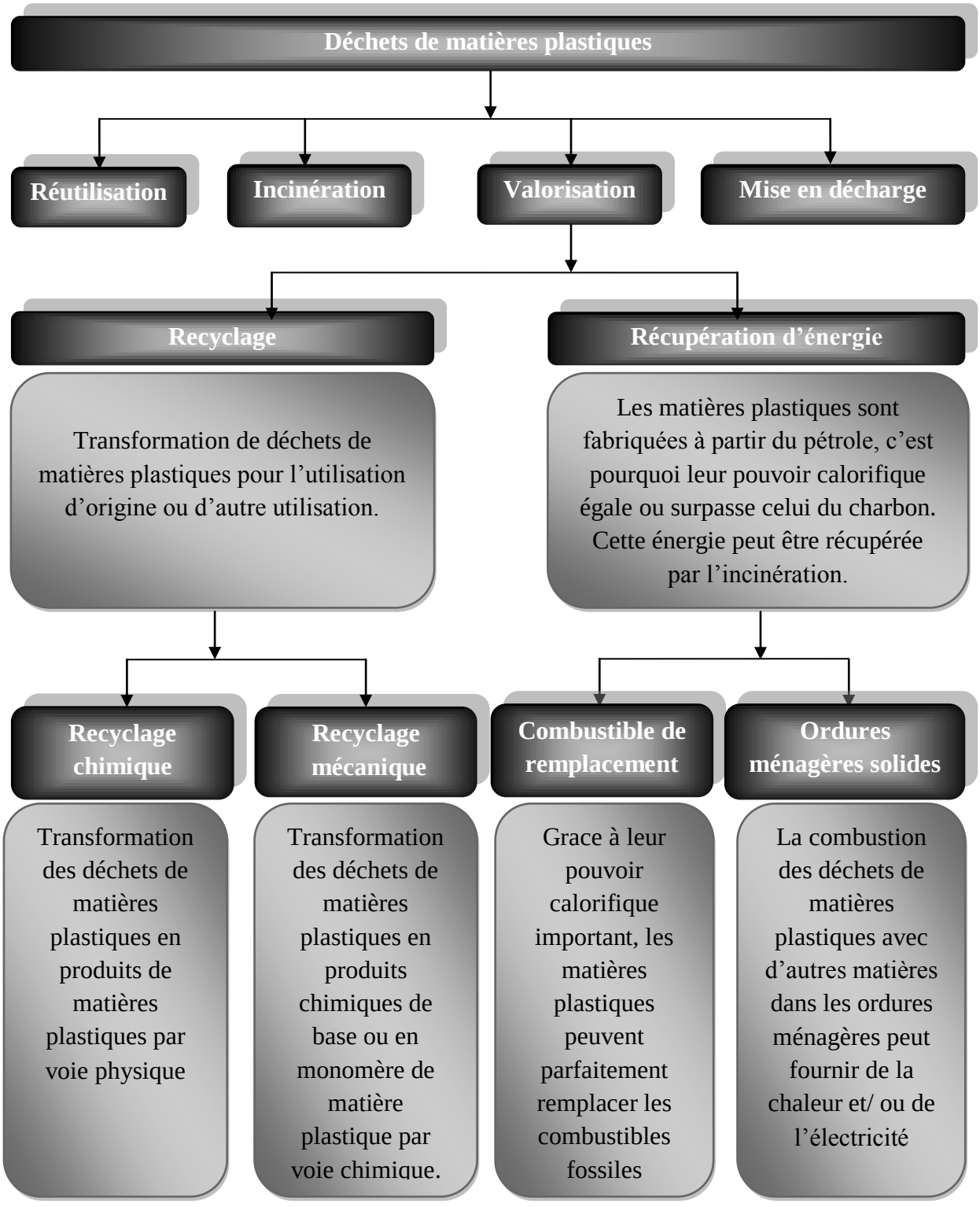
D. La tenue au vieillissement des plastiques

La tenue au vieillissement dépend de la nature des liaisons chimiques du polymère: ainsi, certains plastiques en milieu acide ou alcalin sont sensibles à l'hydrolyse, et nombreux sont ceux qui doivent être protégés contre les ultraviolets.

I.3.6.5 Le recyclage des plastiques

Il se heurte à deux difficultés: d'une part les déchets plastiques, légers, sont épars et difficiles à collecter économiquement en tonnages importants, d'autre part les différentes familles de plastiques ne sont pour la plupart pas miscibles, et ceux qui se mélangent donnent des produits médiocres. On doit soit procéder à des collectes très sélectives ou à des tris rigoureux, soit accepter de fabriquer des objets dont l'épaisseur compense la faiblesse mécanique.

En dehors du recyclage, on peut trouver de nouveaux emplois aux divers déchets plastiques, par exemple le renforcement des talus ou des bitumes pour revêtements routiers par des films déchiquetés. Mais, dans la majorité des cas, la valorisation la plus satisfaisante sur le plan économique est le recyclage thermique, c'est-à-dire l'incinération avec récupération d'énergie: en équivalents pétrole, environ 50 % de l'énergie consommée pour la fabrication des plastiques sont ainsi restitués.



Organigramme I.2 : Les diverses options pour la gestion des déchets de matières plastiques

I.4 LES BETONS DE FIBRES

I.4.1 introduction

L'innovation dans les sciences de la construction passe en partie par le développement de nouveaux matériaux et la maîtrise de leurs propriétés. Le béton renforcé de fibres est l'un de ces matériaux. Les fibres augmentent la résistance mécanique du béton, réduisent son retrait plastique, augmentent sa résistance aux impacts et améliore sa résistance au feu. Avec ce matériau, les ingénieurs sont capables de projeter de nouvelles structures originales par leur design et leur conception, mais aussi par leurs capacités à résister aux diverses sollicitations extérieures.

Les caractéristiques de ce type de matériaux repose sur la présence de fibres qui peuvent être de différentes natures : métalliques, synthétiques, naturelles, fibres de verre ou de carbone…

L'influence des fibres apparait de différentes manières selon les auteurs : par leur capacité à contrôler les fissures, comme des absorbeurs d'énergie, par leur capacité à transférer les charges, par leur résistance en traction, … mais la plupart d'entre eux s'accordent à reconnaitre que les paramètres conditionnant ces propriétés sont (outre la nature des fibres) leur densité volumique, et leur orientation.

I .4.2 Définition de béton de fibres

Nous rencontrons aujourd'hui plus spécialement dans le bâtiment et travaux publics, un produit dont les constituants, le mode de fabrication, les propriétés et le comportement correspondant à ceux des matériaux composites. Il s'agit du béton de fibres composé d'une matrice cimentaire et des fibres apportant une armature à celle-ci.

Le béton de fibres est un matériau composite certes (mélange de ciment, granulats, eau, et fibres), mais qui doit être considéré comme homogène (fibres correctement réparties avec orientation aléatoire), comme peut l'être un béton classique, à la différence du béton armé traditionnel dans lequel le positionnement des armatures est défini en fonction des efforts appliqués.

Autrement dit, Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

Il ne s'agit donc pas d'un béton armé dans lequel on aurait remplacé l'armature traditionnelle en acier (treillis soudés et barres) par des fibres; de ce fait le béton de fibres ne doit pas être abordé à partir « d'équivalence » avec le béton armé tel qu'on le connaît actuellement. Il s'agit d'un produit nouveau présentant notamment une résistance à la traction encore faible par rapport à la résistance à la compression, mais toutefois mobilisable dans des conditions normales de sécurité, pour lequel il est nécessaire de :

- Définir des prescriptions de fabrication et de mise en œuvre pour qu'il y ait effectivement « béton de fibres »
- Etudier les lois de comportement de façon à préciser ses domaines spécifiques d'utilisation et définir des critères de dimensionnement
- L'incorporation des fibres diverses dans le matériau fragile qu'est le béton a fait et continue de faire l'objet de nombreuses recherches; plusieurs applications ont également vu le jour.

Remarque :

Le béton de fibres est un matériau composite (matrice cimentaire, granulats, fibres et vides). Il peut être considéré comme matériau composite homogène (renfort réparti dans le milieu orienté ou non), comme peut l'être un béton classique, mais différemment du béton armé traditionnel dans lequel le positionnement des armatures répond à la stricte nécessité de reprendre des efforts de traction, de cisaillement.

Il ne s'agit donc pas d'un béton armé dans lequel on aurait remplacé l'armature traditionnelle en acier (barres et treillis soudés) par des fibres ; de ce fait le béton de fibres ne doit pas être abordé à partir " d'équivalence " avec le béton armé tel qu'on le connaît actuellement. Il s'agit d'un produit nouveau.

Des recherches systématiques ont été menées depuis 1960 pour comprendre le comportement sous diverses sollicitations du béton renforcé par des fibres. Ce dernier a fait l'objet d'un intérêt particulier de la part de nombreux chercheurs qui ont publié divers articles et rapports sur le sujet **[60], [61]**.

En 1975, lors de la conférence internationale de RILEM, les nombreux rapports expérimentaux ont permis de vulgariser le sujet, ce qui a permis de collecter d'énormes informations sur les propriétés des matériaux composites et leurs applications.

L'association fibre béton constitue un matériau composite ayant un comportement différent de celui du béton classique, qui se caractérise principalement par sa bonne résistance à la traction et à la fissuration.

I.4.3 Historique

En 1910, Porter a suggéré pour la première fois l'utilisation de fibres métalliques dans le béton dans l'optique d'améliorer les performances mécaniques du béton **[62]**.

Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures **[63]**. Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BFM), en tant que matériau dans les applications industrielles, a vu le jour aux Etats-Unis au début des années 60 suite aux travaux de **[64]** conduisant au dépôt d'un brevet. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un superplastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent.

I.4.4 Principe de renforcement.

Le mécanisme de renforcement du béton par des fibres consiste à répartir régulièrement des fibres assez courtes dans le matricule béton. Ce réseau de fibres va s'opposer, et ce d'autant qu'il est plus dense, à l'élargissement de la fissure ; la ou les premières fibres rencontrées effectuent une couture de la fissure jusqu'à bloquer l'évolution ; si les efforts excessifs persistent, d'autres fissures vont se former, qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres.

Le renforcement par les fibres du béton permet donc de freiner la propagation incontrôlée des fissures, ce qui permet à celui-ci d'acquérir qualités (ténacité, résilience) ou d'améliorer certaines caractéristiques.

I.4.5 Utilisation des bétons fibrés

Le béton renforcé de fibres (BRF) est utilisé dans tous les domaines de la construction, aussi bien industrielle, commerciale, institutionnelle que résidentielle, et son utilisation ne date pas d'hier, Le (**Tableau I.4**) illustre quelques applications de bétons renforcés de fibres et leurs intérêts.

Tableau I.4 : Applications de bétons renforcés de fibres

Applications	Intérêts apportés par l'ajout des fibres dans le béton
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	-Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations …).	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Energie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	- Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries souterrains	- Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé - Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement

I.4.6 Comportement Mécanique des bétons fibrés

Le comportement de ce matériau composite est assez compliqué et difficile à cerner parce qu'il dépend de plusieurs facteurs dépendant eux mêmes de plusieurs variables tels que :

- Les propriétés des fibres qui dépondent :
  - La nature de fibre (acier, verre, polymère ou végétale)
  - L'élancement des fibres.
  - La quantité d'incorporation des fibres.
- Les propriétés de la matrice qui dépendent aussi :
  - De la qualité et la quantité de ciment.
  - De la qualité et les dimensions des granulats.
  - Du rapport E/C.
- Le comportement de la bande d'interface qui dépend :
  - De la longueur des fibres
  - De la distribution des fibres, leur orientation et leur espacement.
  - De type de cure
  - Du mode de chargement.
- Les conditions de la mise en œuvre qui dépendent :
  - Du mode de remplissage du béton (pression, vibration).

I.4.6.1 Résistance a la compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforce 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 a l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer a l'endommagement et donc limiter la charge maximale **[65]**.

I.4.6.2 Resistance a la traction par flexion

L'augmentation de la résistance en flexion du béton de fibre est beaucoup plus importante, elle peut atteindre 200 % et plus. Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion. La flexion varie avec la géométrie de la fibre, son orientation et son adhérence à la matrice **[65]**.

Avec les fibres de polypropylène, Dardare **[66]** a obtenu des augmentations de résistance en flexion beaucoup plus faible est même des diminutions lorsque le pourcentage dépassait 1%, Il explique ces diminutions par des mauvaises homogénéités du béton, dues à, des valeurs E/C trop élevées. Ainsi, le pourcentage de 1 % en volume doit être un maximum à ne pas dépasser.

I.4.6.3 Résistance au choc

Sous l'action de sollicitation dynamique, les structures en béton de fibres présentent souvent un très bon comportement, en augmentant les charges de rupture, en modifiant parfois les schémas de fissuration. Certains auteurs (Dardare et autre **[66]**) vont jusqu'à comparer le renforcement par des fibres au renforcement par armatures traditionnelles.

I.4.6.4 Résistance à l'usure

La résistance à l'abrasion du béton de fibres n'est pas sensiblement augmentée. D'autres auteurs affirment qu'après élimination de la laitance superficielle et mise à jour des fibres, la résistance est améliorée d'environ 15 % **[67]**.

I.4.6.5 Résistance aux agents extérieurs

La résistance du béton renforcé de fibres aux attaques du milieu ambiant, par exemple à l'action du gel, dépend de la qualité de la matrice et ne devrait pas être très différente de celle d'un béton ordinaire. Les fibres peuvent cependant réduire les dommages dus au gel car elles empêchent la fissuration. Pour obtenir une bonne résistance au gel et à la corrosion par le sel, Il faut aussi s'assurer qu'il y a suffisamment d'air entraîné dans le mélange **[67]**.

I.4.7 La finition du béton fibré

Le béton fibré peut être fini grâce à des techniques conventionnelles, mais quelques précautions doivent être prises pour éviter l'apparition de fibres en surface et pour minimiser les risques d'éclatement des arêtes lors de la réalisation des traits de scie des joints de contrôle. En voici quelques-unes :

- utiliser une truelle d'aplanissement double
- placer la truelle le plus à plat possible sur la surface du béton
- utiliser un aplatissoir après le réglage du béton
- utiliser une règle de dressage, un équipement laser et des poutres lisseuses

Il est important :

- d'éviter le plus possible l'utilisation de truelle à angles trop prononcés et de truelle simple
- de ne pas effectuer les opérations de finition de manière prématurée ou tardive, ou encore d'effectuer une finition à la main

I.4.8 formulation, fabrication et mise en œuvre

La fabrication d'un béton de fibres ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. Comme pour tous les bétons modernes, il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. Il n'existe pas encore, comme pour les autres bétons **[68]**, d'outil informatique d'aide à la formulation.

La formulation d'un béton de fibres reste donc une démarche essentiellement expérimentale. On peut retenir de la littérature quelques grands principes de formulation. Pour une matrice donnée (pâte et granulat), la maniabilité décroît lorsque la quantité de fibres ajoutée augmente.

Pour améliorer l'ouvrabilité, il convient d'utiliser une quantité de fines (sable et ciment) plus importante que pour un béton ordinaire **[69]** (l'ACI propose par exemple d'utiliser un rapport sable sur gravillon égal à 1 **[70]**). En ce qui concerne les fibres, plus le rapport longueur sur diamètre (L/D) est élevé, plus grand est le risque de former des pelotes **[71]** qui rendent difficile la mise en œuvre et nuisent au comportement mécanique. De plus, la longueur des fibres doit rester supérieure à deux fois la taille du plus gros granulat (L>2D) pour rendre possible leur action mécanique au niveau des macrofissures.

Une méthode rationnelle de formulation a été mise au point au cours des années 80 **[72], [73]**. Elle a pour point de départ la méthode Baron - Lesage **[74]** de formulation des bétons. Elle est basée sur les deux postulats suivants :

- pour un rapport (massique) E/C et une quantité de pâte (E+C) donnés, le béton le plus compact a une maniabilité optimale
- l'optimum de compacité (déterminé par la constitution du squelette granulaire : sable plus gravillons) n'est pas modifié lorsqu'on fait varier les quantités E/C et E+C.

I.4.9 Durabilité des bétons de fibres

La durabilité à long terme des BF est un problème qui se pose aux fabricants et aux utilisateurs. Elle dépend de :

- la nature et du traitement des fibres
- la qualité des ciments utilisés **[75, 76]**
- le mode de conservation **[76], [77], [78]**

Plusieurs essais effectués à long terme sur les résistances à la traction et à la flexion des BF d'acier et de polymère, révèlent que ces types de béton présentent une bonne durabilité dans les milieux secs et humides.

TOLËDO et al. **[79**] ont étudié l'effet des cycles de séchage/mouillage sur la charge de rupture des matrices cimentaires renforcées par des fibres végétales de sisal et de coir. Ils ont remarqué que la charge de rupture diminue avec le temps, surtout la charge de rupture supportée par les fibres après fissuration de la matrice et après un certain nombre de cycles de séchage/mouillage

I.4.10 Avantages et inconvénients des B.R.F

Les améliorations suivantes des propriétés des bétons de fibres sont considérées comme acquises.

- Résistance à l'impact plus élevée
- Augmentation de l'énergie de rupture
- Amélioration de la ductilité.
- Comportement différent à la fissuration
- Entraînant un retard notable de la fissuration.

Mais il a été remarqué certains inconvénients dus à l'utilisation de fibres:

- Réduction de la maniabilité du fait de la présence des fibres quand le pourcentage de celles-ci est élevé
- Introduction d'un certain type de fibres dans le béton avec les moyens traditionnels se révèle très difficile
- Pendant la livraison, les fibres sont enchevêtrées, d'où la formation d'oursins lors du malaxage implique la difficulté de mise en place
- Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du m3 de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

I.5 BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

I.5.1 introduction

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, l'incorporation des fibres dans le béton reste problématique du point de vue de l'ouvrabilité et de la répartition homogène des fibres. Pour remédier à ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAP) paraît prometteuse.

En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité. L'absence de vibration de ces matériaux évite une distribution hétérogène des fibres dans la matrice.

Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs ont montré qu'il peut être une solution appropriée pour les applications sur poutres en I en béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration **[80]**.

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. D'après **[81]**, cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement.

Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « Slump Flow » et l'essai d'étalement modifié dit « J-Ring » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage.

Pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré), appelé aussi « béton témoigne ».

I.5.2 Influence des fibres sur les propriétés a l'état frais

Grunewald **[82]** a réalisé un programme (2001, 2003, 2004, 2005) dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat.

Pour la composition de référence, le rapport S/G de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, les conclusions ci-après ont été tirées.

I.5.2.1 Effet sur l'étalement

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans la composition de référence. On remarque aussi sur la (**Figure I-33-a**) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique, ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions.

En outre, pour certaines compositions voir (**Figure I-33-b**) avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La (**Figure I-33-c**) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu.

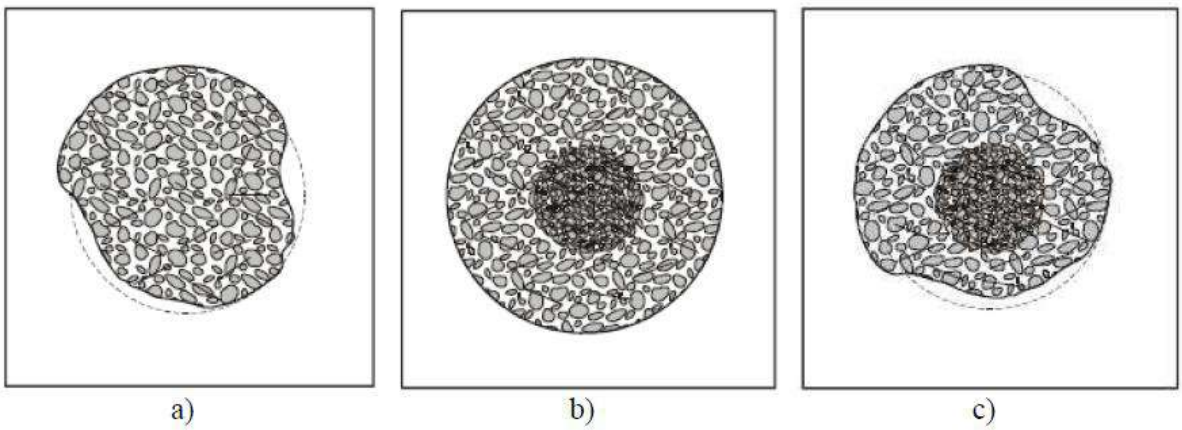


Figure I.25 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP

[82]

Sachant que l'élancement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, Grünewald et Walraven **[82]** se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres Vf et l'élancement. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

I.5.2.2 Essai de V-Funnel

Les temps d'écoulement à travers l'entonnoir (V-Funnel) pour les différentes compositions directement après malaxage sont dans une gamme comprise entre 4,5s et 5,7s.

On note une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulat par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. Les temps de passage à travers l'entonnoir à t =1h sont nettement plus élevés qu'à t =0h.

I.5.2.3 Essai J-RING

Le J-Ring est un essai d'étalement modifié par les japonais pour évaluer la sensibilité au blocage des bétons fibrés dans le milieu confiné notamment par les armatures. Les fibres affectent de manière significative la capacité de passage par rapport à la composition de référence sans renfort de fibres.

L'espacement exigé des barres pour le non blocage augmente avec le dosage en fibre. **[83]** ont réalisé une étude sur le comportement à l'état frais des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques et ont conclu que l'écoulement est obstrué par les barres, ce qui crée une différence de niveau entre le béton restant à l'intérieur de l'anneau et celui passé à travers. L'élancement de la fibre, la teneur des granulats (fins ou gros) et les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment affectent également ce comportement.

I.5.2.4 Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique)

Grünewald et Walraven **[82]** ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement.

Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1 %, la viscosité plastique accroît avec une pente très faible. Au-delà de cette valeur, cette dernière devient nettement plus grande et l'écoulement du béton frais est quasi nul justifiant ainsi la consistance élevée du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues.

I.5.3 Orientation et distribution des fibres

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. **[84]** a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats.

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

Groth et Nemegeer **[85]** a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion.

I.5.4 Utilisation des BAP fibres dans les structures

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure.

I.5.4.1 Palplanches

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois (maintenant en acier). Il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait dans la terre pour former un encaissement dans l'eau. Spanbeton ; un producteur hollandais d'éléments en béton préfabriqués propose aujourd'hui des palplanches en béton. Ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier. Comparés à ceux en acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure, (**Figure I.33**).



Figure I.26 : Deux types de palplanche

I.5.4.2 Voussoirs

Les voussoirs subissent souvent des dommages au cours de la construction. Les fibres, en réduisant la fragilité du matériau, peuvent éviter l'endommagement du béton d'enrobage qui est provoqué par le placement imprécis des voussoirs.

Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu (**Figure I.34**).



Figure I.27 : Exemple d'une voussoire

I.5.5 Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration.

I.5.5.1 Comportement à la flexion

D'après Groth **[81]** une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

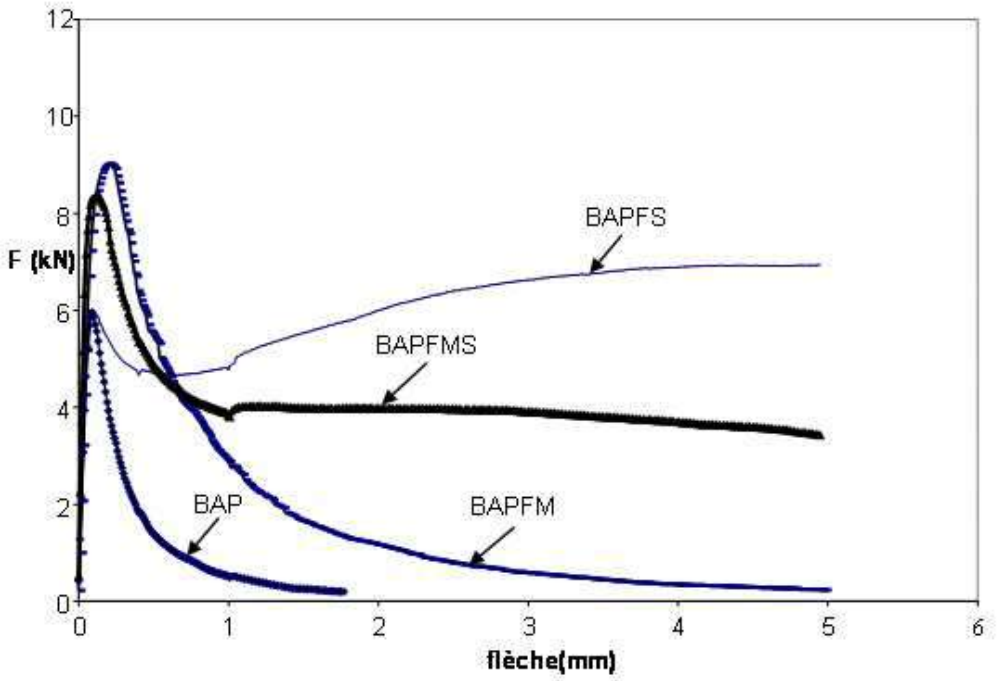
Alcantara 2004,2005 **[86] [87]**, Granju et al 2004 **[88]** ont étudié le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibraflex (FM) et synthétiques de type polypropylène (FS).

Les dosages utilisés étaient de 20 kg/m3 pour FM, 9 kg/m3 pour FS et (10 FM + 4,5 FS) kg/m3 pour un fibrage mixte.

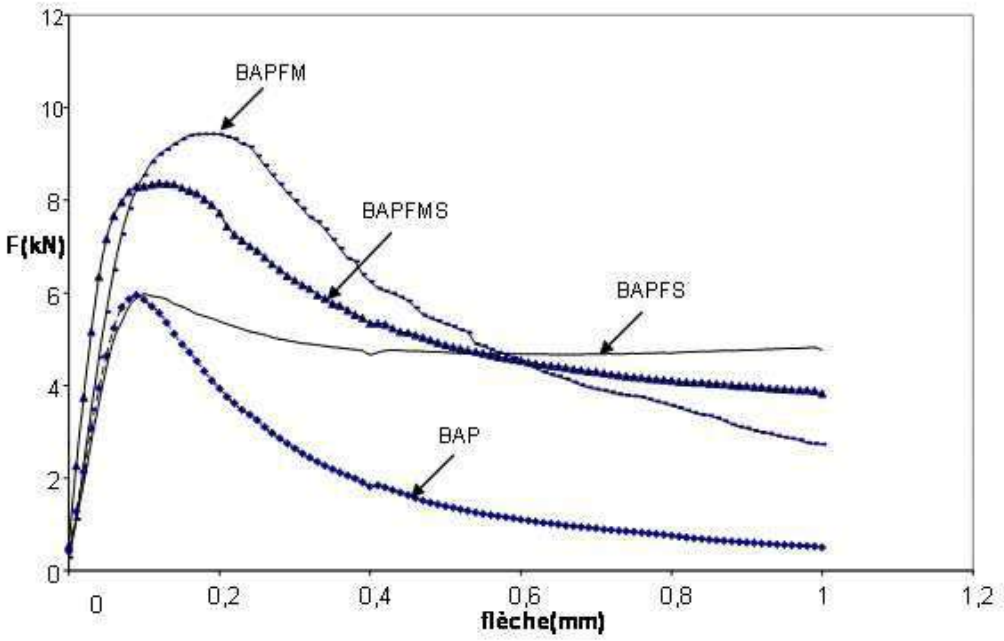
Les résultats obtenus sont détaillés ci-après.

- Les fibres métalliques « FM » qui sont réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.

- Les fibres synthétiques « FS » n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, elles confèrent tout de même au système une résistance résiduelle post-pic maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges.
- L'association des deux types de fibres peut donc constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.
- Les BAP semblent conférer une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques. Les **figures (I.35a** et **I.35b)** illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en termes de courbe force-flèche.



a) Détail jusqu'à une flèche de 6mm



b) Détail jusqu'à une flèche de 1mm

Figure I.28 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions, Alcantara 2004 **[86]**

Kawamata et al 2003 **[89]** ont montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliorait le comportement à la flexion des bétons.

I.5.5.2 Comportement à la compression et à la traction

Dans la même étude réalisée par Alcantara 2004 **[86]**, l'auteur a conclu que la résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/C.

Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports R_{comp}/R_{trac} entre 7 et 28 jours. Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction.

À partir d'essais de traction directe effectués par Pons et Al 2007 **[90]**, Les auteurs en ont tiré les principales conclusions ci-après ;

- Les fibres métalliques réputées très adhérentes agissent dès les plus faibles ouvertures de fissures ; elles confèrent au matériau une résistance apparente en traction améliorée en agissant dès la microfissuration
- Les fibres synthétiques, glissantes, seront mises en tension plus progressivement et vont ponter les macrofissures en faveur d'une résistance résiduelle à la traction maintenue les deux types de fibres ont des effets complémentaires en agissant sur des niveaux d'ouvertures de fissure différents.

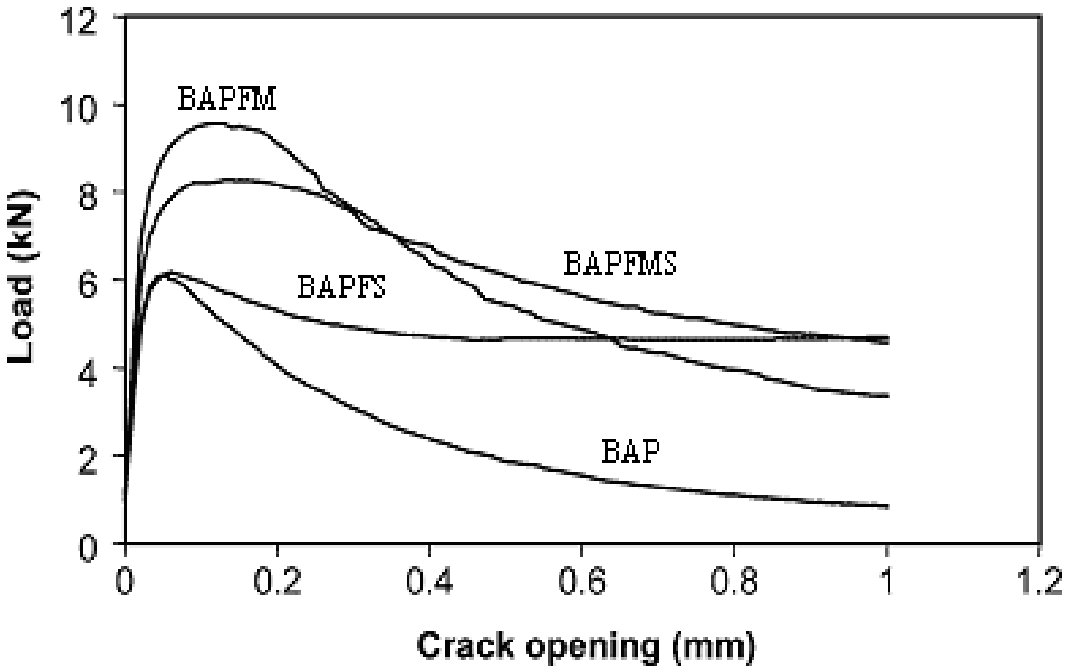


Figure I.29 : Comportement à la traction de différentes compositions, Pons et Al 2007 **[90]**

I.6 CONCLUSION

Le mots clés sous-tendant de notre programme de recherche étant les bétons autoplaçants fibrés, nous avons, dans cette étude bibliographique, passé en revue les points susceptibles de nous guider dans le choix des matériaux à utiliser et dans la définition des essais à effectuer afin de faire progresser notre connaissance dans l'utilisation de ces matériaux en Génie Civil.

Nous avons vu que les bétons renforcés de fibres permettaient d'améliorer, sous certaines réserves, les capacités mécaniques du matériau initial béton. Nous avons détaillé les différents paramètres de composition influents et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques du BOF et BAPF.

Ainsi les fibres améliorent le comportement du béton vis-à-vis de la fissuration. Cette fissuration devient plus répartie avec des ouvertures plus fines. Le béton fibré gagne en ductilité et l'énergie pour atteindre la ruine finale est d'autant plus importante.

L'utilisation de bétons autoplaçants permet, en l'absence de vibration pour sa mise en place, d'obtenir, sous réserve d'études préalables d'écoulement, des répartitions de fibres optimisées.

Plusieurs chercheurs (locales et même étrangers) ont étudié le comportement des bétons autoplaçants renforcés de divers types de fibres (BAP renforcé de fibres métalliques, BAP renforcé de fibres végétales,….etc).

Dans cette étude, on s'intéresse à étudier l'influence de l'introduction des fibres plastiques sur les propriétés des BAP, puis on va comparer nos résultats avec celui des autres.

CHAPITRE II

MATERIAUX ET ESSAIS

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les matériaux de construction utilisés pour la confection des bétons autoplaçants avec leurs caractéristiques et les essais faites au laboratoire, comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues à savoir :

- La granularité ou le fuseau granulaire du squelette
- Les dosages en sable, gravier, ciment, eau, superplastifiant

La caractérisation des bétons autoplaçants de fibres plastiques, à l'état frais et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai.

Les différents essais faits au cours de ce travail sont :

La caractérisation des matériaux s'est faite sur trois types de béton :

- BAPT : béton autoplaçant témoin sans fibres
- BAPFPO : béton autoplaçant de fibres plastiques ondulées
- BAPFPR: béton autoplaçant de fibres plastiques rectiligne

Cette étude permet la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur béton frais et sur béton durci.

Essais sur béton frais

- Essai d'étalement Slump Flow
- Essai d'entonnoir V-Funnel
- Essai de la boite en L L-Box
- Essai de stabilité au tamis

Essais sur béton durci

- Essai de compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm
- Essai de compression sur éprouvette cylindrique 16x32 cm pour 28 jours
- Essai de module d'élasticité sur éprouvette cylindrique 16x32 cm pour 28 jours
- Essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm
- Absorption d'eau par capillarité
- Retrait 7x7x28 cm
- Gonflement 7x7x28 cm

II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Matine) **(Figure II.1**), est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Lafarge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[91].**

Le **tableau II.1** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clincker, selon la fiche technique du ciment **[92].**

Tableau II.1 : L'analyse chimique du ciment et composition du clinker.

Analyse chimique du ciment	Perte au feu (%) (NA 5042)	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clincker	Silicates tricalciques C_3S (%)	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C_3A (%)	6.00-8.00



Figure II.1 : Le ciment utilisé **(Annexe A)**

II.2.2 Granulats

II.2.2.1 Sable

A. Sable (0/3)

Le premier sable utilisé provient de la région de **Mont Guorno** (**Figure II.2**) , c'est un sable concassée ayant un module de finesse de 3.18, et un équivalent de sable de 88.34 % (NF P18-598) **[93]**, taux d'absorption d'eau 0.38 % (NF P18-555) **[94]**, la masse volumique apparente 1530 kg/m^3 (NF P18-555) **[94]**, La masse volumique absolue 2631 kg/m^3 (NF P18-555) **[94]**. L'analyse granulométrique est présentée dans la **figure II.6**.

B. Sable roulé

Le deuxième sable utilisé provient de la région de Hassi Bahbah (**Figure II.3**) , c'est un sable naturel ayant un module de finesse de 0.72, et un équivalent de sable de 61.73 % (NF P18-598) **[93]**, taux d'absorption d'eau 0.02 % (NF P18-555) **[94]**, la masse volumique apparente 1435 kg/m^3 (NF P18-555) **[94]**, La masse volumique absolue 2613 kg/m^3 (NF P18-555) **[94]**. L'analyse granulométrique est présentée dans la **figure II.6**.



Figure II.2: Sable concassée



Figure II.3: Sable Roulé

II.2.2.2 Gravier

A. Gravier (3/8)

Le premier gravier utilisé provient de la région de **Mont Guorno** (**Figure II.4**), c'est un gravier concassée ayant un taux d'absorption d'eau 0.19 %, la masse volumique apparente 1373 kg/m^3 (NF EN 1097-3) **[95]**, la masse volumique absolue 2666 kg/m^3, résistance aux chocs 27.92 % (NF EN 1097-2) **[96]**, L'analyse granulométrique est présentée dans la **figure II.7**.

B. Gravier (8/15)

Le deuxième gravier utilisé provient de la même région présidente (**Figure II.5**), c'est un gravier concassée ayant un taux d'absorption d'eau 0.19 %, la masse volumique apparente 1373 kg/m^3 (NF EN 1097-3) **[95]**, La masse volumique absolue 2666 kg/m^3, résistance aux chocs 24.60 % (NF EN 1097-2) **[96]** , L'analyse granulométrique est présentée dans la **figure II.7**.



Figure II.4 : Gravier de Mont Guorno 3/8



Figure II.5 : Gravier de Mont Guorno 8/15

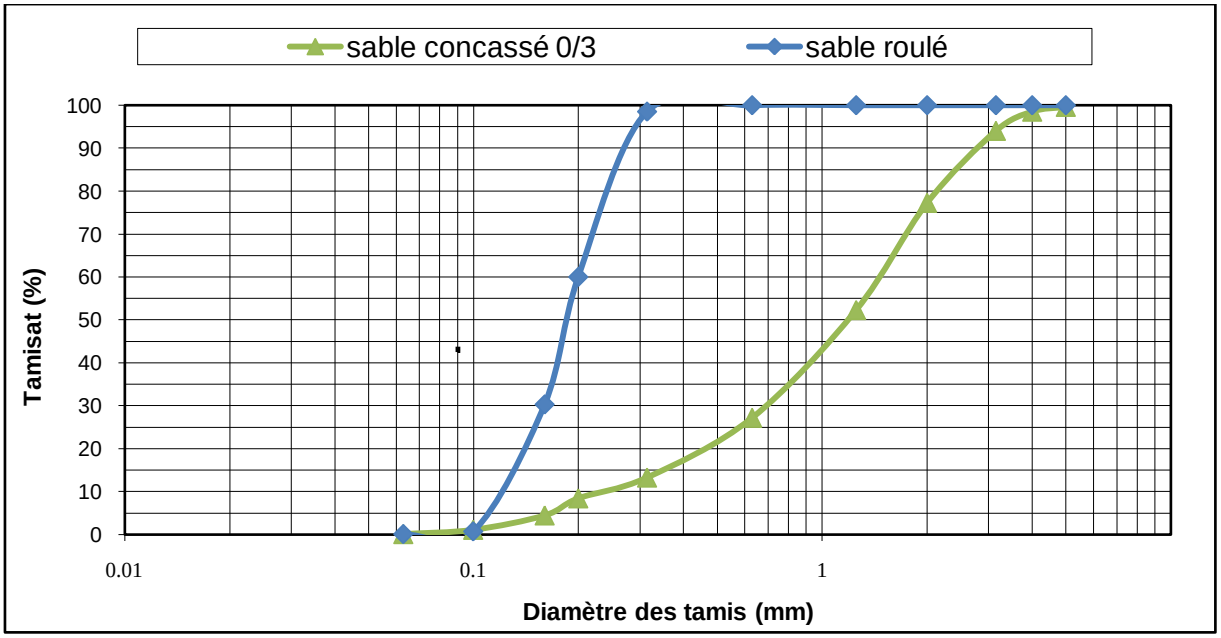


Figure II.6: Analyse granulométrique des sables

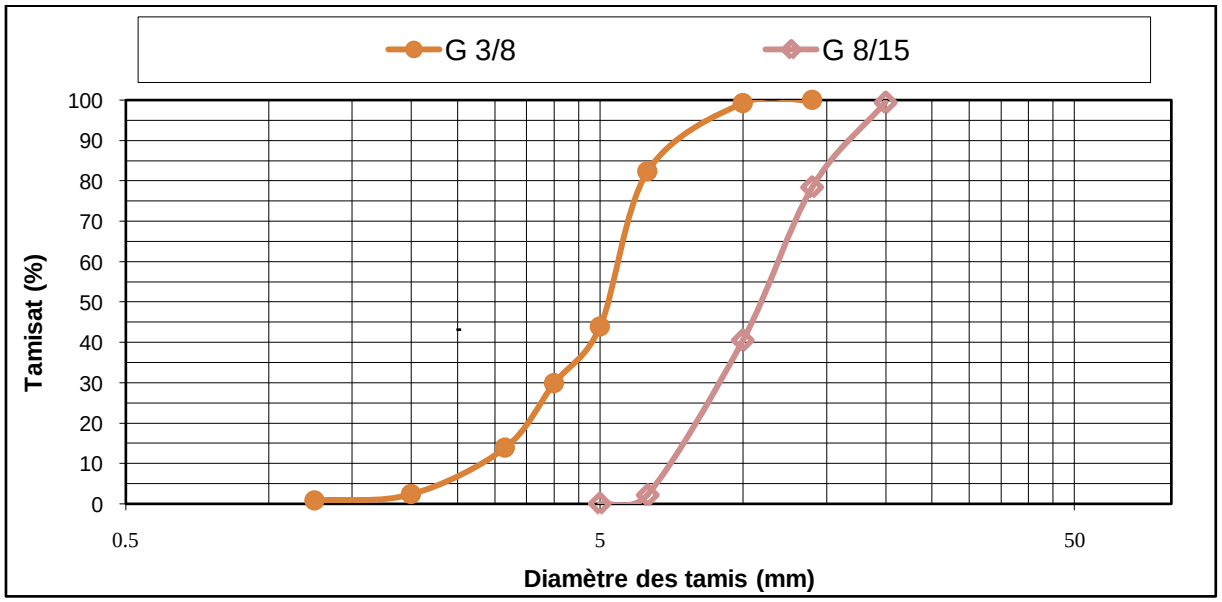


Figure II.7: Analyse granulométrique des graviers

II.2.3 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire sans passer par l'analyse chimique de cette eau. Sa température était comprise entre 10 et 22°C.

II.2.4 Superplastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom suivant :

MEDAFLOW 145 ; Il est à base de polycarboxylates d'ether (PC), sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment **[97]. (Annexe B).**

Ses caractéristiques sont :

- Aspect ……. Liquide
- Couleur ……... Brai clair
- PH …… 5-6
- Densité …… 1.065 ± 0.016
- Teneur en chlore …… < 1 g/l
- Extrait sec …….. 30 ± 1.5%



Figure II.8 : MEDAFLOW 145

II.2.5 Fibres plastique

Ce sont des fibres de forme ondulés et rectilignes, ils sont obtenus par le recyclage des déchets plastiques (PET). On prépare les fibres pour obtenir une longueur de 3.5 , 4 et 5 cm de longueur, et de diamètre de 4 mm que nous avons déterminé par l'appareil de pied à coulis et de masse volumique 690 kg/m^3

Nous avons incorporé ces fibres dans le béton par addition par rapport au volume du béton avec des pourcentages de 0.3 %, 0.5 %, 0.8 %, 1.0 %, 1.2 %, 1,4 % pour chaque type et chaque longueur, (**Figure II.9**).

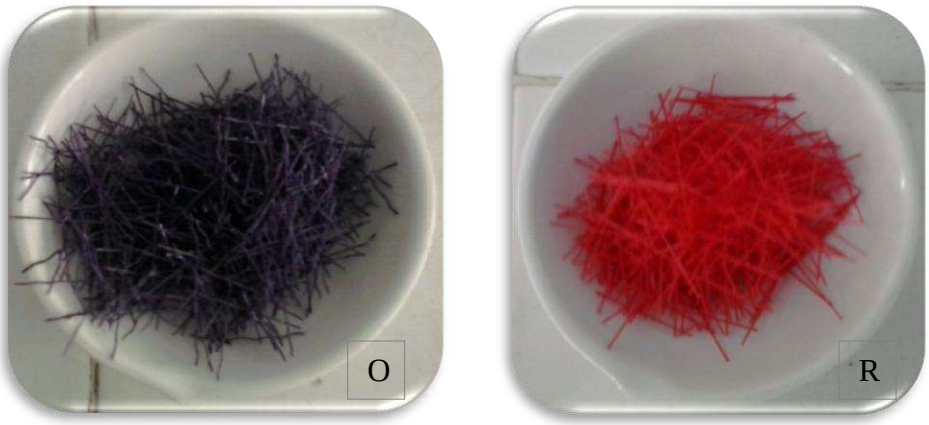


Figure II.9 : Différentes formes de fibres utilisées

Pour la déterminer de la masse volumique des fibres utilisées, les étapes suffisantes sont à suivre :

- On pèse une masse de fibres
- On met une quantité d'eau dans un récipient gradué et on note la valeur lit
- On met la masse de fibres mesurée dans le récipient puis on relit la valeur

La **figure II.10** nous montre les étapes précédentes

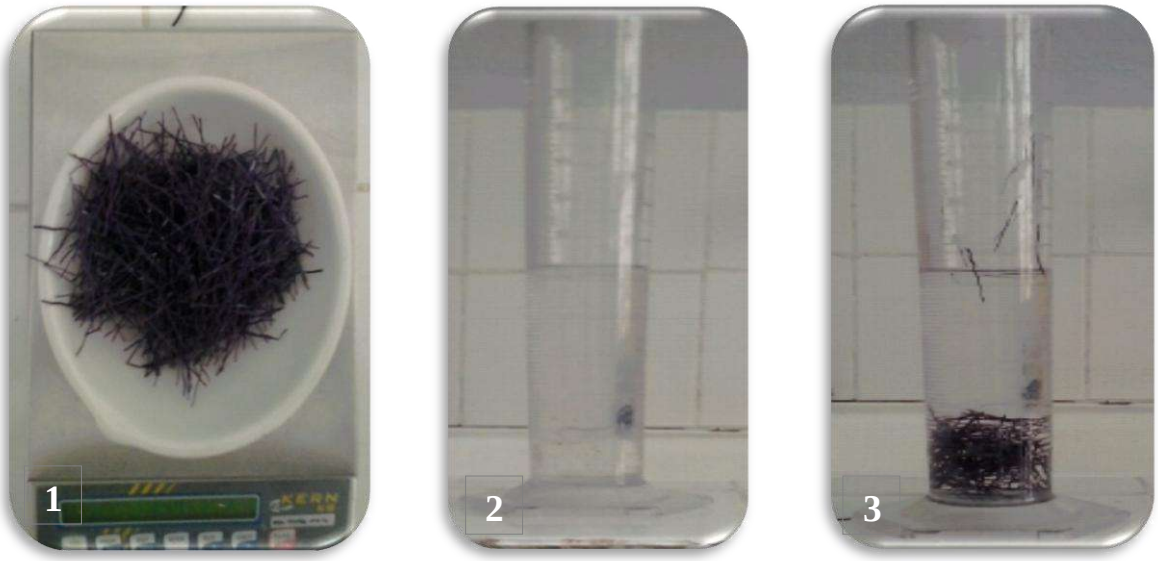


Figure II.10 : Protocole de l'essai de La masse volumique pour les fibres plastique

II.3 La formulation du béton

Les principales propriétés des BAP sont une grande fluidité et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés sont à priori contradictoires pour un béton ordinaire; l'obtention de l'une faisant souvent au détriment de l'autre.

Pour réaliser un BAP, il faut obtenir une suspension fluide suffisamment dense de manière à éviter le tassement des plus gros constituants.

À résistance équivalente les BAP ne se différencient des bétons ordinaires que par une quantité supérieure de pâte, regroupant le ciment et les particules fines, par l'introduction d'un superplastifiant et par l'utilisation d'un faible volume de gravillon.

Leur formulation requiert une étude précise notamment dans le choix des constituants, l'optimisation de la teneur en ajout chimique et de la quantité d'eau.

Les caractéristiques des BAP doivent permettre d'assurer :

- la mobilité des matériaux en milieux confinés et non confinés.
- la stabilité, c'est à dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

Les BAP ont une grande capacité de remplissage en zone confinée car leur fluidité et leur résistance à la ségrégation sont telles que le phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle est évité. Ce dernier dépend des propriétés et de la proportion de la pâte qui est directement liées aux caractéristiques du liant et à la quantité d'eau libre, c'est-à-dire à la quantité d'eau non retenue par les différents constituants. Si le béton contient une forte quantité d'eau libre, une partie des gravillons se sépare facilement du mélange et les forces de collisions et de friction augmentent jusqu'à la formation de voûtes ce qui accentue la ségrégation des constituants.

L'effet de la variation des types des fibres plastiques sur ces propriétés est analysé en fixant : le rapport Sable/Mortier à 0.45 et le rapport E/C à 0.40 et le pourcentage de superplastifiant à 0.9% pour toutes les compositions. En faisant varier le pourcentage de deux types des fibres plastiques de 0.3 %, 0.5 %, 0.8 %, 1.0 %, 1.2 %, 1,4 % de façon à étudier l'effet direct de cette variation.

Nous avons commencé notre recherche et essais par fabrication des bétons, ils sont fabriqués par gâchée de 33 litres dans un malaxeur d'une capacité maximale de 40 litres.

Le **tableau II.2** présente les différentes compositions des bétons confectionnés lors de la deuxième étape de cette étude. Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe A. Ces bétons contiennent des volumes fixes en sable et en gros granulats de diamètre maximum 15 mm de l'eau, de ciment et de superplastifiant ; et des volumes variables des fibres plastiques.

Tableau II.2: Compositions des différents BAPFPR étudiés dans 1 m^3 du béton.

BAPFPR		Ciment (kg)	Sable 0/3 (kg)	Sable roulé (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Eau (kg)	Superplastifiant (kg)	E/C	Les fibres (kg)
0	0,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	0
BAP 3,5 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52
	1,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	6,90
	1,2%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	8,28
BAP 4 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52
	1,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	6,90
BAP 5 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52

Tableau II.3: Compositions des différents BAPFPO étudiés dans 1 m^3 du béton.

BAPFPR		Ciment (kg)	Sable 0/3 (kg)	Sable roulé (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Gravier 8/15 (kg)	Eau (kg)	Superplastifiant (kg)	E/C	Les fibres (kg)
0	0,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	0
BAP 3,5 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52
	1,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	6,90
	1,2%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	8,28
BAP 4 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52
	1,0%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	6,90
	1,2 %	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	8,28
BAP 5 cm R	0,3%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	2,20
	0,5%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	3,45
	0,8%	524	481,8	321,2	398	398	210	4,72	0.40	5,52

II.4 Techniques expérimentales

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes en vigueur.

II.4.1 Séquence de malaxage du béton

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable.

Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 40 litres. Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences.

Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans la **figure II.11**, elle suit les étapes suivantes :

- Calculer la quantité d'eau effective que l'on va mettre dans la bétonnière. Ce calcul permet de prendre en compte l'eau contenue dans les gros granulats et le sable tout en connaissant le coefficient d'absorption de chacun **(Annexe C**)
- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (**Annexe C**)
- Malaxer le sable, ciment et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau)
- Malaxer pendant 5 minutes et introduire les fibres plastiques qui sont mouillées précédemment, progressivement en pluie au mélange
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Malaxer pendant 30 secondes.

La séquence de malaxage suivie est la même pour tous les mélanges des BAP fibrés.



Figure II.11 : Séquence de malaxage du béton autoplaçant témoin et fibré.

II.4.2 Essais sur béton frais

Les essais de caractérisation sur béton frais sont résumes dans le **tableau II.4** Suivant :

II.4.2.1 Essais d'étalement et T_{50}

Cet essai consiste à déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son propre poids en faisant face aux forces de friction. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité du béton autoplaçant**.**

A. Matériel nécessaire

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté et graduée à un diamètre de 50 cm (pour mesurer le T_{50})
- Slump Flow disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur
- Chronomètre
- Mètre ou règle de 90cm.

B. Mode opératoire

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon)
- Placer et centrer le Slump Flow sur la plaque et équiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir
- Prélever un échantillon de béton représentatif
- Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône

- Retirer l'entonnoir et araser si nécessaire à l'aide d'une truelle
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées
- Lancer le chronomètre dès le soulèvement du cône jusqu'à ce que le béton atteigne le cercle de 50 cm gradué sue la plaque, cette mesure c'est le T_{50}
- Une fois que le béton s'est étalé sur la plaque, mesurer le diamètre final sur deux côtés perpendiculaires, Le résultat est exprimé en moyenne des deux valeurs obtenues
- Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de béton (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier)



Figure II.12 : Protocole de l'essai d'étalement.

II.4.2.2 Essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Cet essai permet d'estimer le temps de vidange de béton sous son propre poids. Le temps mesuré indique la fluidité et la capacité de béton a passé dans des orifices qui sont petites (capacité de passage / blocage).

A. Matériel nécessaire

- Entonnoir en V (V-Funnel) dont les dimensions sont indiquées dans la **figure II.13**
- Chronomètre
- Un seau de capacité de 12 litres

B. Mode opératoire

- Placer le V-Funnel dans un endroit stable et s'assurer que le clapet est bien fermé
- Prélever dans un seau un échantillon de béton représentatif d'environ de 12 litres
- Remplir l'entonnoir avec le béton
- Mettre le seau au dessous de l'orifice de l'entonnoir et ouvrir le clapet
- Remplir l'entonnoir une deuxième fois de béton
- Mettre le seau au dessous de l'orifice de l'entonnoir
- Après une attente de 10 secondes, ouvrir le clapet en laçant le chronomètre
- Arrêter le chronomètre quand la première lumière est apparue à travers l'orifice de l'entonnoir, cette mesure est le temps d'écoulement
- Refaire l'essai 3 fois
- Le résultat est exprimé en moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues

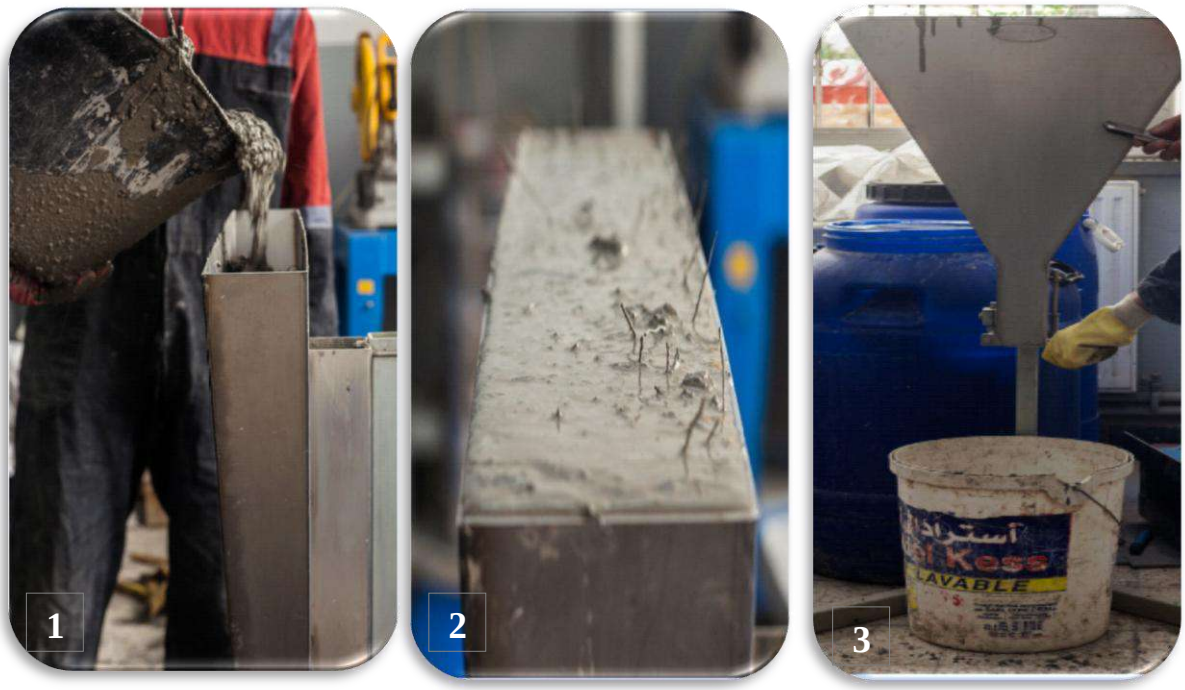


Figure II.13 : Protocole de l'essai d'entonnoir (V-Funnel).

II.4.2.3 Essai de stabilité au tamis

Il permet de tester la ségrégation du mélange frais.

A. Matériel nécessaire

- Seau de 10 litres de capacité + couvercle
- Tamis 5 mm + fond
- Bascule : précision minimale 20 gr, portée minimale 20 kg

B. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de 10 litres de béton juste après le malaxage
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation
- Attendre 15 mn
- Peser le fond et le tamis à vide
- Peser le fond seul
- Poser le tamis + fond sur la bascule et faire la tare
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire ressuage à la surface du seau après 15 mn
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 (tolérance ± 0.2 kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de 50 cm ± 5 cm
- Noter le poids de l'échantillon
- Attendre 2 mn
- Peser le fond avec la laitance on a

$$\boldsymbol{P}_{\text{laitance}} = \boldsymbol{P}_{\text{fond+laitance}} - \boldsymbol{P}_{\text{fond}}$$

- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\textit{Masse del'échantillon}}.100$$



Figure II.14 : Protocole de l'essai de stabilité au tamis.

II.4.2.4 Essai de la boîte en L (L-Box)

Cet essai est réalisé en utilisant une boite ayant une forme en L. Elle permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

La partie verticale de la boite est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boite à travers le ferraillage. La distance libre entre les barres est de 39 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellent de granulats en aval de la grille. C'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de H_1. Cette mesure est plus précise que le rapport H_2/H_1 mais son utilisation est moins répandue.



Figure II.15 : Protocole de l'essai de la boîte de L-Box.

II.4.3 Remplissage des moules

D'après faire les essais de béton a l'état frais on doit remplir les moules pour la conservation des éprouvettes pour les essais a l'état durci, pour ca on a besoin de

- moules 10x10x10 cm pour l'essai de compression
- moules 7x7x28 cm pour les essais de retrait, gonflement et traction par flexion
- moule 32x16 cm pour l'essai de module d'élasticité



Figure II.16 : Protocole de remplissage des moules

II.4.4 Démoulage et conservation des éprouvettes

On prélever un échantillon du béton afin de remplir des éprouvettes cubiques de 10x10x10 cm et des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm et éprouvette 32x16 cm . On stocke les éprouvettes dans une salle en attendant de les démouler 24 heures après. Après 24 heures on démoule les éprouvettes et on les place dans un bac rempli d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à l'échéance de l'essai, pour maintenir l'humidité satisfaisante et la température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, afin d'assurer un bon mûrissement du béton.



Figure II.17 : Conservation des éprouvettes.

II.4.5 Essais sur Béton durci

II.4.5.1 Résistance à la compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cubique normalisées de 10 cm d'arrête (norme NF EN 12390-3 **[98]**, NA 427**[99]**).

La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 2000 KN conforme à la norme NF P 18-412**[100],** (**Figure. II.23**).



Figure II.18 : Presse hydraulique (2000 kN)

Les éprouvettes sont conservées sans être déplacée pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante :

L'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de {0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 10x10x10 cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN /s} 4 KN / s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.



Figure II.19 : Protocole de l'essai de compression

II.4.5.2 Résistance à la traction par flexion

Des spécimens prismatiques, 70 par 70 par 280 mm, ont été coulés pour chaque mélange de béton pour essais de flexion 3 points, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20 ° C (EN 12390-2).La résistance à la flexion a été évaluée selon la norme EN 12390-5 sur des éprouvettes prismatiques par le calcul de la contrainte de traction maximale atteinte au fond de la section transversale du milieu de l'échantillon testé. Le module de rupture (MOR) a été obtenu comme suit:

$$Mor = \frac{3}{2} x \frac{L.d}{e^3}$$

Où L est la charge maximale appliquée (N), d est la distance entre les supports (250 mm), et «e» est la dimension de la section carrée (70 mm).



Figure II.20 : Protocole de l'essai de traction par flexion

II.4.5.3 Retrait et gonflement

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) conformément à la norme NF P 15-404 **[101].**

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (**Figure. II.26**) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (de 1j jusqu'à 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C, et le gonflement la conservation des éprouvettes est faite à un bac d'eau de température de 25 à 30°C.



Figure II.21 : Le réctractomètre

A. Mesure des variations de longueur

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots, etc.).Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 280 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est

réalisée en métal Invar ou protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).même métal que l'appareil

B. Mesure des variations de masse

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g prés l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur.



Figure II.22 : Protocole de l'essai de retrait



Figure II.23 : Protocole de l'essai de gonflement

C. Expression des résultats

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL: Variation de longueur par apport à la longueur origine,

L0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

ΔM: Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

D. Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 280 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t; l'éprouvette a une longueur au temps considéré:

$$l = L + dl(t)$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par **ε**et a pour expression:

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette.

Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement).

II.4.5.4 Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher et on le pesé (m_0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (**Figure II.29**), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (m_i- m_0) (NE 13057) **[102]**.



Figure II.24 : Absorption d'eau par succion capillaire

II.4.5.5 Le module d'élasticité :

A. Installation de l'étrier

Pour installer l'étrier correctement, on doit suivre les étapes suivantes

- Passer les 2 couronnes de l'étrier autour d'une éprouvette cylindrique dont les extrémités ont été préalablement rectifiées (au disque ou au souffre)
- Centrer l'éprouvette sur Je plateau de la presse
- Placer les piges autour de l'éprouvette et poser la couronne inférieure sur les piges
- Lorsque sa position est calée (couronne située à 1/3 de la hauteur de l'éprouvette), serrer les 2 vis de serrage de la couronne inférieure, puis celle de la couronne supérieure
- Retirer les 3 entretoises en dévissant pour chaque entretoise les *2* vis situées aux extrémités
- Fixer le comparateur sur la couronne supérieure au dessus de la vis d'appui. La pointe du comparateur doit être en contact avec la vis d'appui mais ne doit pas être en butée (course possible).

B. Mode opératoire d'un essai

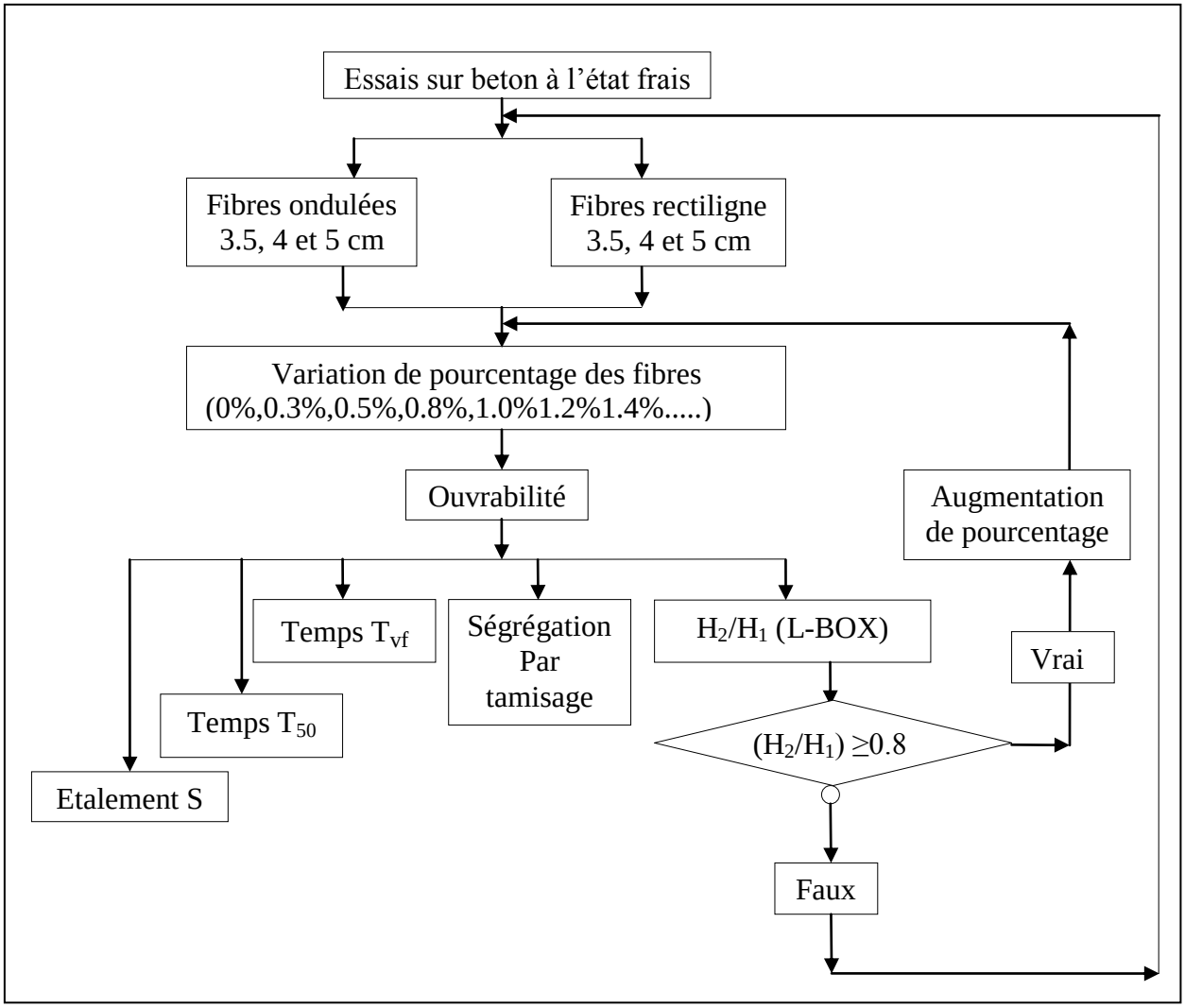
Avant de foire cet essai, il est recommandé de déterminer la force de compression maximale f_{cm} (Force avant rupture) sur une éprouvette de la même série que celle utilisée pour la détermination du module

- Mettre en marche la presse et amener le plateau supérieur de la presse en contact avec l'éprouvette habillée par l'étrier
- Fixer le taux de charge de la presse à 240 kPa +- 30 kPa/s. Durant Fessai, la presse doit fonctionner en continu avec un taux de charge constant
- Mettre en marche le comparateur et l'initialiser : la valeur affichée par le comparateur doit être nulle
- Charger l'éprouvette une $1^{ère}$ fois sans noter les résultats jusqu'à obtenir un déplacement du comparateur E = 0.01 mm. Si le comportement du comparateur et les valeurs affichées de déplacement semblent anormales, revoir la position et la fixation du comparateur. Décharger l'éprouvette
- Réaliser un tableau comme ci-dessous pour noter le déplacement du comparateur e en fonction de la charge F



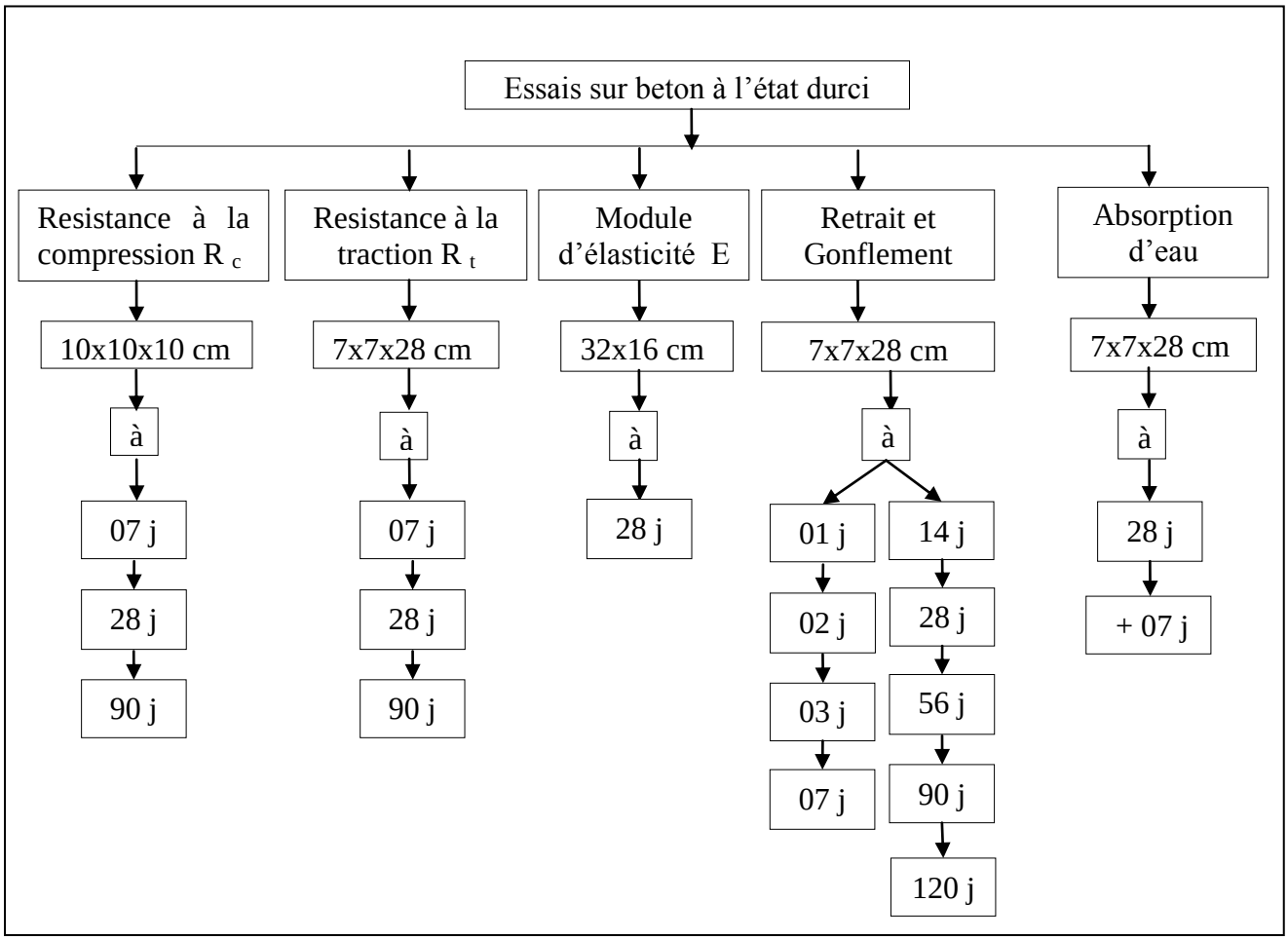
Figure II.25 : L'essai du module d'élasticité

II.4.6 Récapitulation des essais faits à l'état frais



Organigramme II.1 : Essais à l'état frais

II.4.7 Récapitulation des essais faits à l'état durci



Organigramme II.2 : Essais à l'état durci

II.5 Conclusion

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien (le ciment, les granulats, les superplastifiants).

Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur des bétons autoplaçants. Pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (essais d'étalement T_{50} au cône, d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel), de stabilité au tamis, L-Box). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (compression, traction, absorption d'eau, retrait, gonflement). Pour reconnaitre l'effet des fibres plastiques sur le béton Autoplaçant que se soit à l'état frais ou durci.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

Pour les bétons renforcés de fibres, le maximum de la fraction volumique et du type de fibres est déterminée par les propriétés mécaniques souhaitées. Toutefois, pour les bétons autoplaçants, il est nécessaire d'assurer une bonne fluidité et une bonne résistance à la ségrégation. **[103].**

III.2 Béton frais

Pour obtenir un béton autoplaçant renforce de fibres, on a procédé d'incorporer les fibres plastiques pour différentes longueurs et fractions volumiques pour les deux types (rectilignes et ondulées), tout en assurant la fluidité, la capacité de passage, de remplissage et la résistance à la ségrégation recommandées par EFNARC **[104],** les **tableaux III.1** et **III.2** résument les différents résultats de différente mélange à l'état frais.

Tableau III.1 : Résultats obtenus sur les BAPFPR étudiés à l'état frais

Fibre rectiligne						
Type de béton		D (mm)	T_{50}	V-funnel (sec)	H_2/H_1 (%)	Stabilité au tamis (%)
0%	0,0%	860	0,56	3,96	94,2	4,25
BAP 3,5 cm R	0,3%	810	0,81	4,15	89,47	4,47
	0,5%	805	0,83	4,2	87	4,65
	0,8%	795	0,85	4,35	84,31	4,95
	1,0%	775	0,95	4,86	81,9	5,21
	1,2%	755	1,15	13	46,92	5,85
BAP 4 cm R	0,3%	804	1,06	4,78	85,68	5,31
	0,5%	792	1,05	4,82	83,95	5,45
	0,8%	786	1,06	4,89	82,08	5,75
	1,0%	750	1,1	5,21	64,17	6,12
BAP 5 cm R	0,3%	770	1,05	5,11	83,54	5,61
	0,5%	750	1,15	5,51	80,37	5,65
	0,8%	745	1,15	6,3	41,33	5,89

Le deuxième tableau présente la suite des résultats à l'état frais

Tableau III.2 : Résultats obtenus sur le BAPT et les BAPFPO étudiés à l'état frais

Fibre ondulée						
Type de béton		D (mm)	T_{50} (sec)	V-funnel (sec)	H_2/H_1 (%)	Stabilité au tamis (%)
0%	0,0%	860	0,56	3,96	94,2	4,25
BAP 3,5 cm O	0,3%	812	0,58	4,02	88,89	4,18
	0,5%	803	0,72	4,21	85,44	4,36
	0,8%	796	0,92	4,44	84,16	4,64
	1,0%	786	0,99	4,62	80,95	5,05
	1,2%	785	1,25	14,58	44,44	5,54
BAP 4 cm O	0,3%	805	0,68	4,21	83,5	4,85
	0,5%	790	0,86	4,53	82	4,97
	0,8%	783	0,94	4,98	81,9	5,13
	1,0%	777	1,1	5,34	80,05	5,56
	1,2%	770	1,25	15,03	39,49	5,78
BAP 5 cm O	0,3%	765	0,82	4,68	82,65	5,50
	0,5%	745	0,95	4,78	80,04	5,68
	0,8%	735	1,18	5,82	50,65	5,95

III.2.1 Effet des fibres plastiques sur la valeur de T_{500} et l'étalement

Les résultats ont révélé que le temps d'écoulement T_{500} est inferieur à 3.40s recommandé par EFNARC **[105]**, les diamètres d'étalement de tous les mélanges sont situés entre 735 et 860 mm, alors que les diamètres recommandés par EFNARC **[104]** sont entre 650 et 800. Les **figures III.1** et **III.2** montre l'effet de la longueur des fibres et la forme sur l'étalement des BAP. On note que les valeurs d'étalement, pour les mélanges des bétons confectionnés avec une longueur de 35 mm sont moins affectées que les mélanges confectionnés avec des fibres de longueur de 40 et 50 mm respectivement, on note aussi, que les valeur d'étalement, pour les mélanges des bétons confectionnés avec des fibres ondulées sont moins affecté que les mélanges confectionnés avec des fibres rectilignes cela est dû à la souplesse remarquable des fibres ondulées par rapport au deuxième type .

L'observation des résultats montre que la plus grande valeur de l'étalement est celle de BAPT avec 860 mm de diamètre, et le plus petit est celle du mélange qui contient des fibres ondulées de 50 mm de longueur et 0,8% comme fraction volumique

En ce qui concerne le T_{500}, la plus petite valeur est celle du BAPT avec 0,56 sec, et plus grande valeur est estimée de 1,15 sec correspondant au mélange qui contient des fibres ondulées de 40 mm de longueur et 0,8% comme fraction volumique.

L'écoulement des BAP fibrés est affecté par l'introduction des fibres, plus on augmente le pourcentage et la longueur des fibres plus l'écoulement diminue **[106], [105], [107]** et **[108]**. Deux observations indiquent que l'écoulement n'est pas homogène, un étalement n'est pas circulaire, cela veut dire que l'écoulement est contracté selon une ou plusieurs directions et une concentration des fibres et des agrégats au centre de la galette déformée après la réalisation de l'essais à travers un cône d'Habrams **[105]**. Laetitia MARTINIE **[109]** a constaté que la forme élancée des fibres multiplie d'autant leur encombrement au sein du matériau. Westerholm et El-Dieb **[110]** et **[111]** ont mesuré une baisse de la fluidité avec l'augmentation de la longueur des fibres, ce phénomène est dû aux perturbations causées par les fibres sur la compacité totale du système.

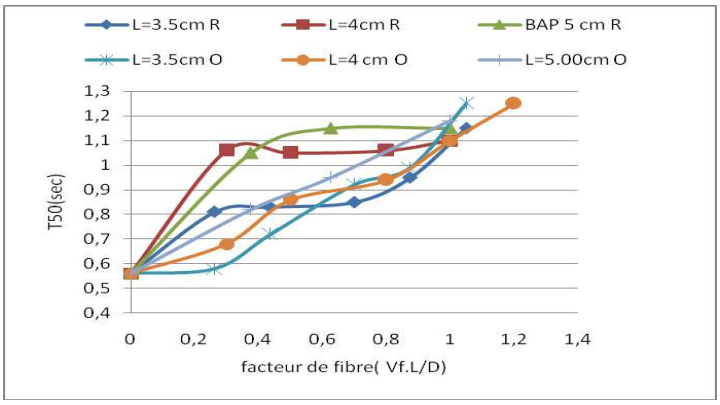


Figure.III.2: T_{500} en fonction de facteur de fibre

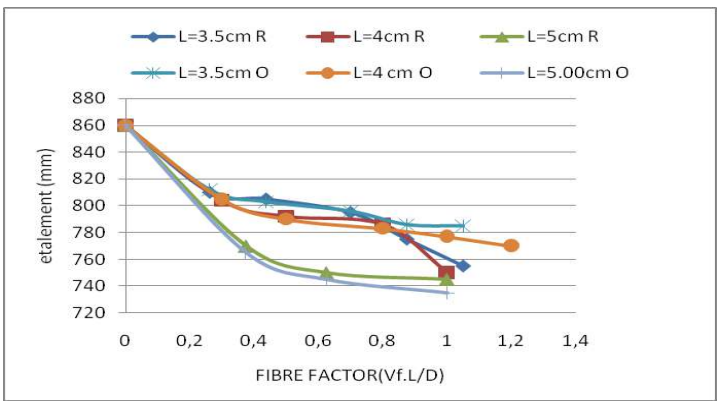


Figure.III.1: L'étalement en fonction de facteur de fibre



Figure.III.3: L'affaissement homogène et contracté

III.2.2 Le temps d'écoulement à travers le V-funnel

L'entonnoir permet la mesure de la vitesse de déformation du béton fluide. La **figure III.4** montre l'effet des fibres sur le temps d'écoulement à travers l'entonnoir des mélanges. Plus les fibres sont ajoutées et plus le rapport d'aspect augmente, plus le temps d'écoulement augmenté.

Le meilleur temps de l'écoulement était 4,02 s mesuré pour le BAPFPO 35 mm de 0,3%, tandis que le BAPFPO 40 mm de 1,2% a eu le temps d'écoulement le plus haut de 15,03 s. Les valeurs recommandées sont de l'ordre de 4 à 12 s, comme il est mentionné dans EFNARC **[104]**. Les valeurs obtenues à travers ces tests sont acceptables pour tous les mélanges.

La **figure III.4a** et **b** montrent l'effet de la longueur des fibres sur le temps d'écoulement des BAP à travers le V-funnel, d'une part, plus on augmente la longueur des fibres plus le temps d'écoulement converge plus rapidement vers le seuil supérieur **[108]** (le cas des fibres de 40 et 50 mm), cette convergence du temps vers le seuil revendique des signes de ségrégations et hétérogénéité des mélanges.

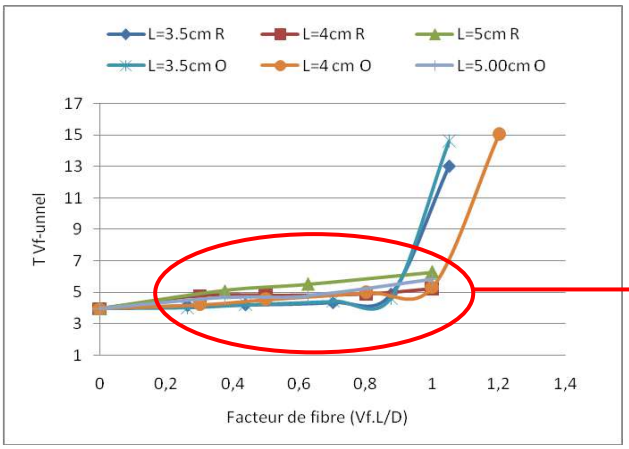


Figure.III.4a : T (V-funnel) en fonction de facteur de fibre

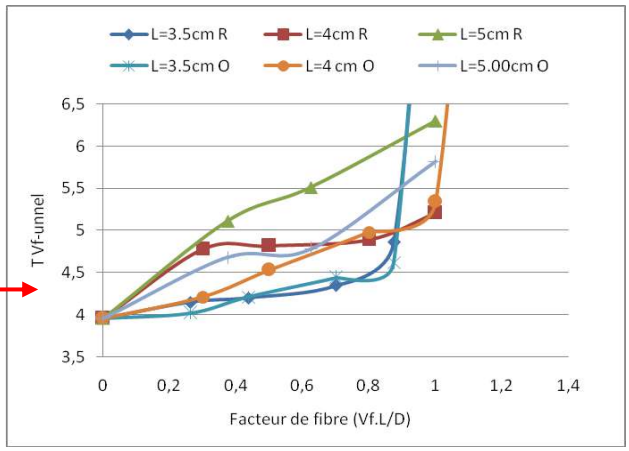


Figure.III.4b : T (V-funnel) en fonction de facteur de fibre

D'autre part, plus on augmente le pourcentage des fibres, plus la formation d'oursins (i.e. amas de fibres entremêlées) est évoluée **[109]**, cette évolution perturbe l'écoulement et par conséquence l'augmentation de la viscosité provoque d'éventuelles ségrégations et blocage au niveau des armatures **[107]**. Ces résultats seront confirmés par la suite à travers l'essai de la boite en L (L-BOX).

III.2.3 Capacité de Remplissage à travers le L –Box

L'essai de la boîte en L (L-Box) donne une bonne appréciation de la capacité de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La figure III.5 montre la variation du rapport H2/H1 en fonction du facteur fibres, le rapport du blocage est situé entre 0,40 et 0,95 le plus faible rapport était 0,39 pour le BAPFPO qui contient des fibres de 40 mm de longueur et une fraction volumique de 1,2%, et le plus important rapport correspond au BAPT. Le rapport minimum à assurer est de 0.8 recommandé par EFNARC **[104]**, les bétons ayants un rapport faible que 0.8 sont inacceptables.

Pour les deux types bétons à base de fibres plastiques rectilignes et ondulées de 35 mm sont bloqués à un pourcentage de 1,2%, les mélanges qui contient des fibres plastiques ondulées de 40 mm est bloqué à un pourcentage de 1,2%, par contre le béton à base de fibres plastiques rectilignes de 40 mm est bloqué à un pourcentage de 1,0%, en ce qui concerne les bétons à base de fibres plastiques de deux types rectilignes et ondulées de 50 mm sont bloqués à un pourcentage de 0,8%.

On a constaté que les fibres ondulées ont une souplesse plus importante que les fibres rectilignes c'est pour ça qu'on a un pourcentage de blocage plus important.

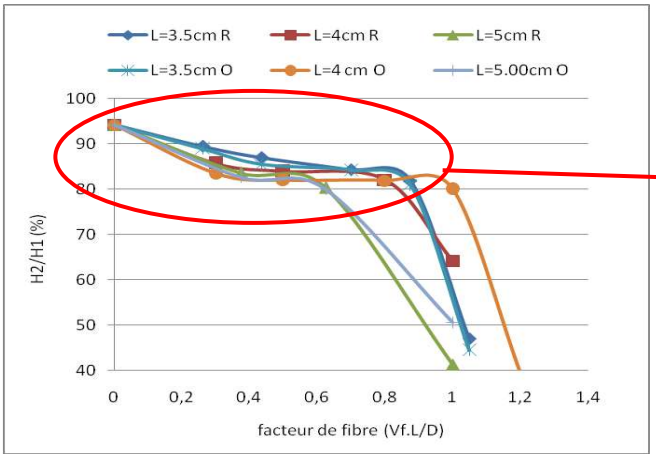


Figure.III.4a: T (V-Funnel) en fonction de facteur de fibre

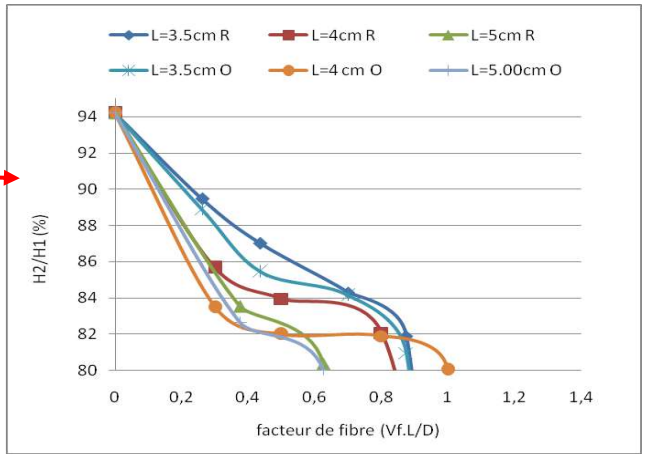


Figure.III.4b: T (V-Funnel) en fonction de facteur de fibre



Figure.III.5: Cas de blocage

Swamy et Mangat [**112**] ont montré l'existence d'une concentration critique de fibres au-delà de laquelle le matériau ne s'écoule plus quelles que soient ses caractéristiques rhéologiques sans fibre. Ce même constat est rapporté par de nombreux chercheurs **[105], [107]** qui notent sur BO ou sur BAP un effet accru des fibres sur l'étalement, au delà d'une certaine concentration de fibres, le matériau est rapporté comme étant trop ferme pour s'écouler. D'autre part pour des facteurs d'aspect de fibres trop élevés, des oursins de fibres se forment, rendant le matériau hétérogène **[109]**.

III.2.4 Stabilité au tamis

La **figure III.4** montre que plus le pourcentage des fibres plastiques augmente plus le taux de ségrégation augmente par rapport au BAPT, cela est due à la diminution de la viscosité du béton autoplaçant, ainsi le collage des fibres au niveau des mailles de tamis est un facteur très influant sur le passage de la laitance du béton ; tout en signalant que les résultats restent dans le marge des bétons autoplaçant

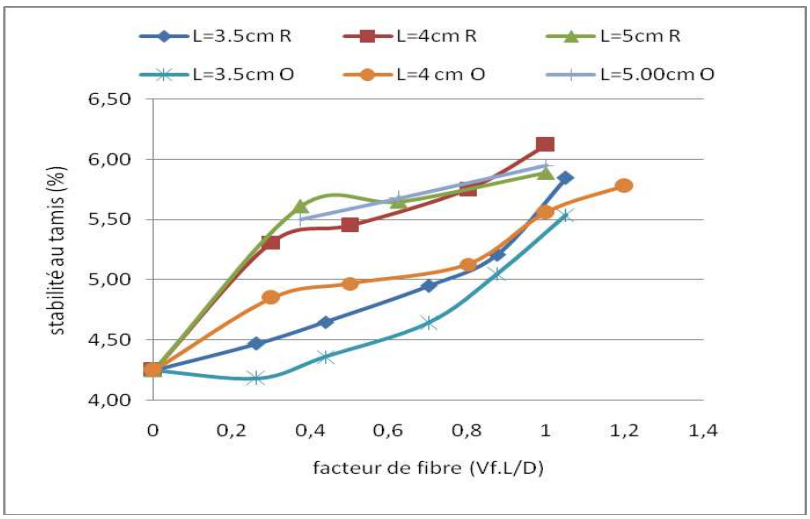


Figure.III.6: Stabilité au tamis en fonction de facteur de fibre

III.2.5 Teneur maximale en fibres

La **figure III.7** montre un classement pour résumer les résultats de l'étude expérimentale concernant l'aspect de la teneur en fibre maximale pour différents mélanges et des différentes longueurs de fibres. Les critères pour juger sur l'auto-compactage étaient un affaissement plus de 600 mm, une forme ronde de l'étalement et une répartition homogène des matières solides. Pas de ségrégation peut se produire, capacité de remplissage et de passage qui satisfait aux recommandations EFNARC.

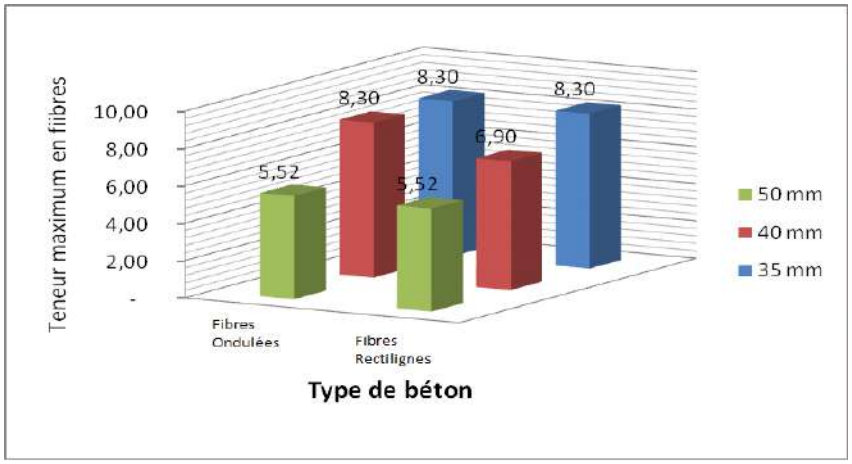


Fig.III.7. Teneur maximum en fibres

A travers les résultats obtenus, seulement bétons autoplaçants, renforce de fibres qui répond aux recommandations **[106]** sont visés pour l'étude de l'effet de la longueur et de la fraction volumique de fibres sur l'état durci.

Les bétons concernés sont:

- Le béton témoin
- Les bétons de fibres ondulées et rectilignes de 35 mm de 0.3% jusqu'au 1.0%
- Les bétons de fibres ondulées de 40mm de 0.3% jusqu'au 1.0%
- Les bétons de fibres rectilignes de 40 mm de 0.3% jusqu'au 0.8 %
- Les bétons de fibres ondulées et rectilignes de 50 mm de 0.3% jusqu'au 0.5%

III.3 Essais sur un béton durci

III.3.1 Résistance à la compression

Neuf échantillons cubiques, 100 mm de dimensions, ont été coulés pour chaque mélange de béton et trois échantillons cylindriques de 320x160 mm pour les essais de compression, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier et ils sont conservé dans l'eau à 20 ° C (EN 12390-2).

Les résultats de compression et traction par flexion sont résumés dans ce tableau pour le BAPT ET les BAPFPO et les BAPFPR

Tableau III.3: Résultats obtenus sur le BAPT pour la compression et la traction

Type de R		Compression en [MPa]				Traction en [MPa]			
La résistance à		-	7 j	28 j	90 j	-	7 j	28 j	90 j
BAP	0,0%	-	45,25	57,48	63,78	-	2,85	4,65	6,23

Tableau III.4: Résultats obtenus sur les BAPFPR pour la compression et la traction

Fibre rectiligne								
Type de R		Compression en [MPa]			Traction en [MPa]			
La résistance à		7 j	28 j	90 j	7 j	28 j	90 j	
BAP 3,5 cm R	0,3%	56,47	65,19	70,16	5,23	5,35	6,26	
	0,5%	61,11	69,22	73,92	5,32	5,54	6,53	
	0,8%	52,65	61,69	70,15	5,38	5,83	6,65	
	1,0%	50,52	58,48	69,35	5,45	5,73	6,88	
BAP 4 cm R	0,3%	53,63	64,72	68,49	5,15	5,57	6,59	
	0,5%	61,14	67,59	71,9	5,48	5,65	6,88	
	0,8%	53,16	65,96	71,86	5,56	5,95	7,18	
BAP 5 cm R	0,3%	45,86	60,95	63,45	5,47	6,18	7,56	
	0,5%	51,46	62,73	65,66	5,63	6,24	7,68	

Tableau III.5: Résultats obtenus sur les BAPFPO pour la compression et la traction

Fibre ondulée							
Type de R		Compression en [MPa]			Traction en [MPa]		
La résistance à		7 j	28 j	90 j	7 j	28 j	90 j
BAP 3,5 cm O	0,3%	51,33	60,25	71,39	5,63	5,95	6,9
	0,5%	54,65	62,13	69,35	5,72	6,01	7,34
	0,8%	51,23	59,92	67,59	5,73	6,32	7,48
	1,0%	51,21	56,23	64,5	5,85	6,35	7,52
BAP 4 cm O	0,3%	55,03	68,74	74,55	5,65	6,18	8,06
	0,5%	54,61	61,23	72,88	5,76	6,34	8,15
	0,8%	51,24	57,36	72,89	5,96	6,54	8,25
	1,0%	50,14	56,23	70,02	6,14	6,75	8,14
BAP 5 cm O	0,3%	52,75	62,82	65,33	5,95	5,85	8,16
	0,5%	53,85	62,95	65,56	6,08	6,55	8,26

Les résultats obtenus à partir du test de résistance à la compression à 7, 28, et 90 jours, et avec différentes fractions volumiques de fibres sont donnés aux **figures III.5 III.6 III.7**. On a constaté que la résistance à la compression est augmenté jusqu'au 0,5% d'addition des fibres avec un pourcentage de 16.97% qui correspond au BAP a base de fibre rectiligne de 35 mm de longueur avec un pourcentage volumique de 0.5% ,après cette valeur la résistance est diminuée plus la fraction volumique de fibres est augmentée, mais elle présente une résistance supérieure ou comparable avec le béton témoin, On a obtenu une légère diminution de la résistance de l'ordre de 4.59%, pour les mélanges qui contiennent un pourcentage élevé des fibres. Les bétons fibrés de 50 mm présentent une augmentation régulière de la résistance.

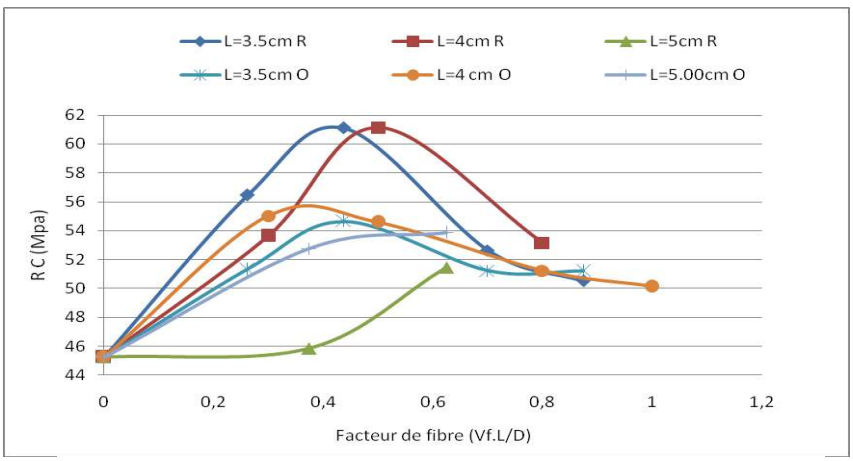


Figure.III.8: La résistance a la compression à 7 jours

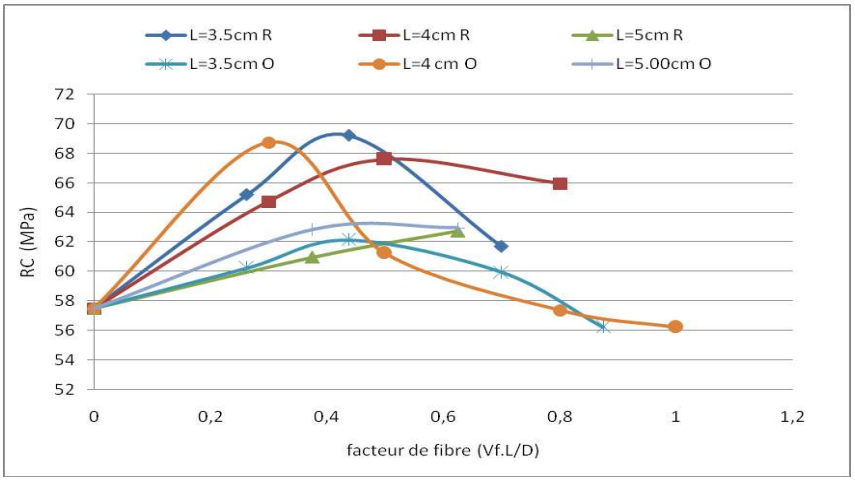


Figure.III.9: La résistance a la compression à 28 jours

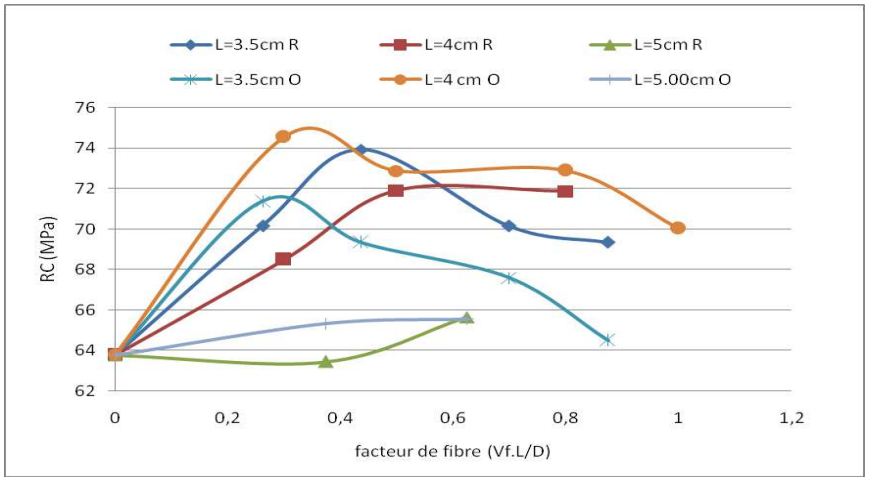


Figure.III.10: La résistance a la compression à 90 jours

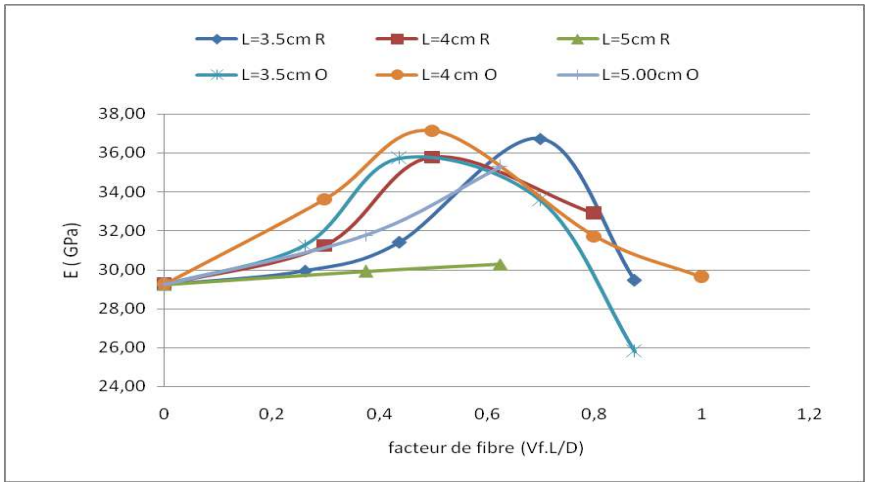


Figure.III.11: La résistance a la compression à 28 jours pour le cylindre

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs de 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 **[111]**. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime**. [113], [114]**, dans d'autres une légère diminution **[115], [116]** et **[117]** peut être dû à l'abaissement de l'ouvrabilité se qui à provoqué une réduction de la compacité **[118]**.

Boulekbache **[119]** confirme une diminution de la résistance à la compression de 6% pour les bétons autoplaçants, les fibres ne sont sollicitées qu'après l'apparition des fissures, particulièrement à la phase post-peak, dans la phase pre-peak. Le béton fibré comporte comme un béton sans fibres .Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : celui en premier de maintenir les fissures ce qui favorise phase post-peak, 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.

III.3.2 Résistance à la traction

Neuf spécimens prismatiques, de 70 par 70 par 280 mm, ont été coulés pour chaque mélange de béton pour essais de flexion 3 points, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20 ° C (EN 12390-2).La résistance à la flexion a été évaluée selon la norme EN 12390-5 sur des éprouvettes prismatiques par le calcul de la contrainte de traction maximale atteinte au fond de la section transversale du milieu de l'échantillon testé. Le module de rupture (MOR) a été obtenu comme suit:

$$Mor = \frac{3}{2} x \frac{L.d}{e^3} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Où L est la charge maximale appliquée (N), d est la distance entre les supports (250 mm), et «e» est la dimension de la section carrée (70 mm). L'utilisation des fibres avec un ensemble de longueurs et en augmentant la fraction volumique peut montrer l'effet de chaque paramètre. La résistance à la traction augmente, l'augmentation la plus faible correspond au béton BAPFPR et correspond plus importantes au BAPFPO-0.8%

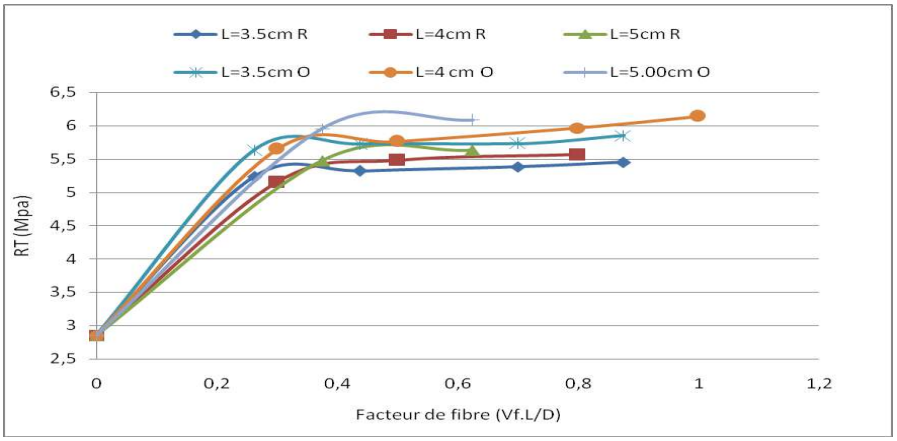


Figure.III.12: La résistance a la traction à 7 jours

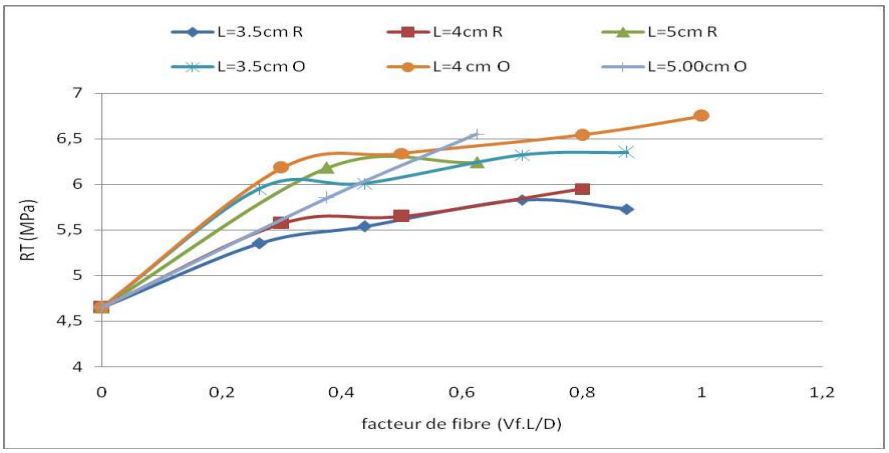


Figure.III.13: La résistance a la traction à 28 jours

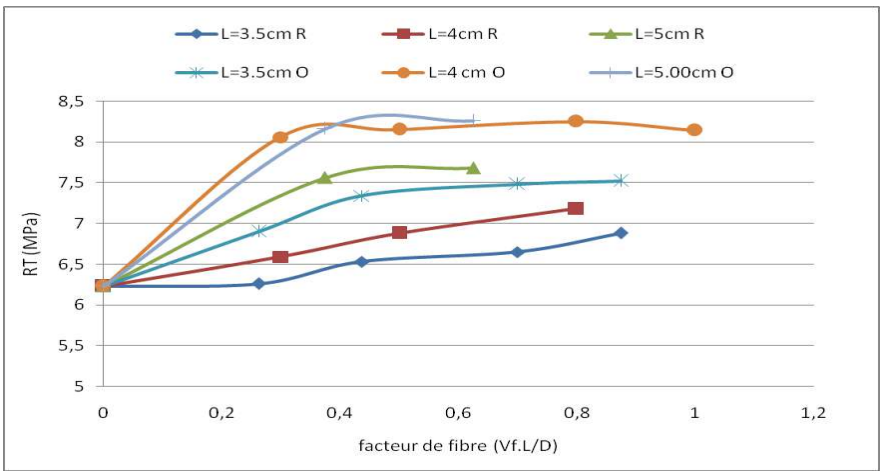


Figure.III.14: La résistance a la traction à 90 jours

Les résultats ont révélé aussi que pour une augmentation de la longueur des fibres, on obtient une amélioration de la résistance à la traction par flexion, si on compare ces bétons, on trouve que plus on augmente la longueur et la fraction volumique des fibres, plus la résistance à la traction par flexion augmente. Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres **[106], [116]** et **[117]**. Kawamata et al **[120]** ont montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliore le comportement à la flexion des bétons. Dans cette étude, les conclusions doivent être entendues dans ces limites, l'auteur ayant utilisé des fibres métalliques de longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un dosage volumique maximal en fibres de 1%.

III.3.3 Module d'élasticité

Trois (03) échantillons cylindriques de 320x160 mm, dimensions, ont été coulés pour chaque mélange de béton, selon la norme ISO 6784. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier et ils sont conservé dans l'eau à 20 ° C (EN 12390-2).

Le tableau suivant résume les résultats obtenus pour les deux types de fibres :

Tableau III.6: Résultats obtenus de module d'élasticité pour les trois types du béton

	E [MPa]				
	BAP 0%			29242,00	
BAP 3,5 cm R	0,3%	29928,00	BAP 3,5 cm O	0,3%	31249,00
	0,5%	31409,00		0,5%	35716,00
	0,8%	36729,00		0,8%	33559,00
	1,0%	29445,00		1,0%	25812,00
BAP 4 cm R	0,3%	31245,00	BAP 4 cm O	0,3%	33630,00
	0,5%	35792,00		0,5%	37140,00
	0,8%	32875,00		0,8%	31727,00
	1,0%	-		1,0%	29615,00
BAP 5 cm R	0,3%	29913,00	BAP 5 cm O	0,3%	31768,00
	0,5%	30271,00		0,5%	35301,00

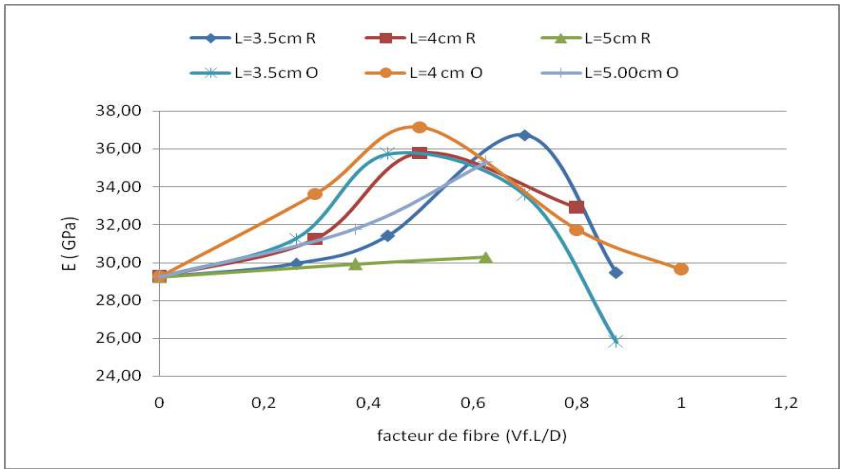


Figure.III.15: Module d'élasticité en fonction de facteur de fibre

D'après le **tableau III.6** et la **figure III.16** suivante on remarque l'évolution du module d'élasticité suit la même trajectoire que la résistance à la compression, le module d'élasticité augmente jusqu'au 0,5% et après cette valeur il diminue tout en augmentant la fraction volumique de fibres pour 28 jours. Avec différentes longueurs des fibres de 35 mm et 40 mm (fibres ondulées et rectilignes), sauf les fibres de 50 mm (fibres ondulées et rectilignes) la résistance a augmentée d'une façon régulière.

III.3.4 Retrait et gonflement

Ces figures présentent l'effet des fibres plastiques sur le retrait et le gonflement du BAPFPR et BAPT.

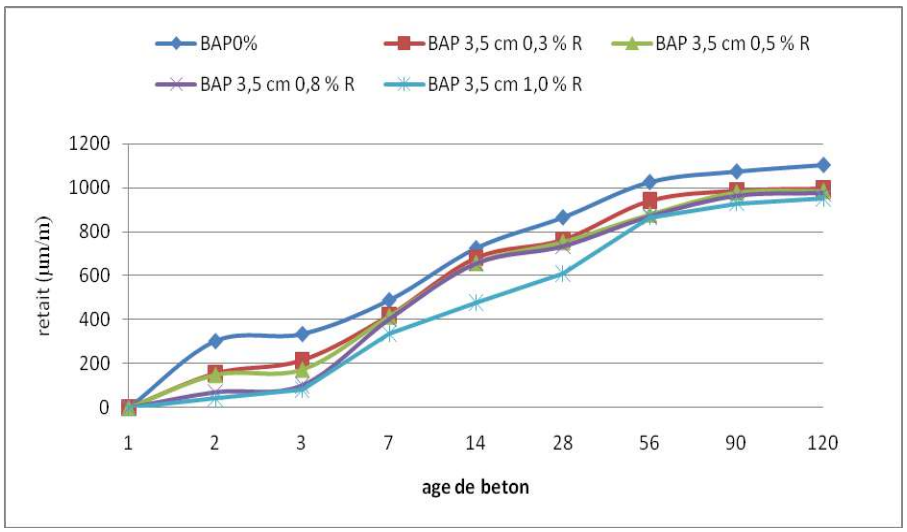


Figure.III.16: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm

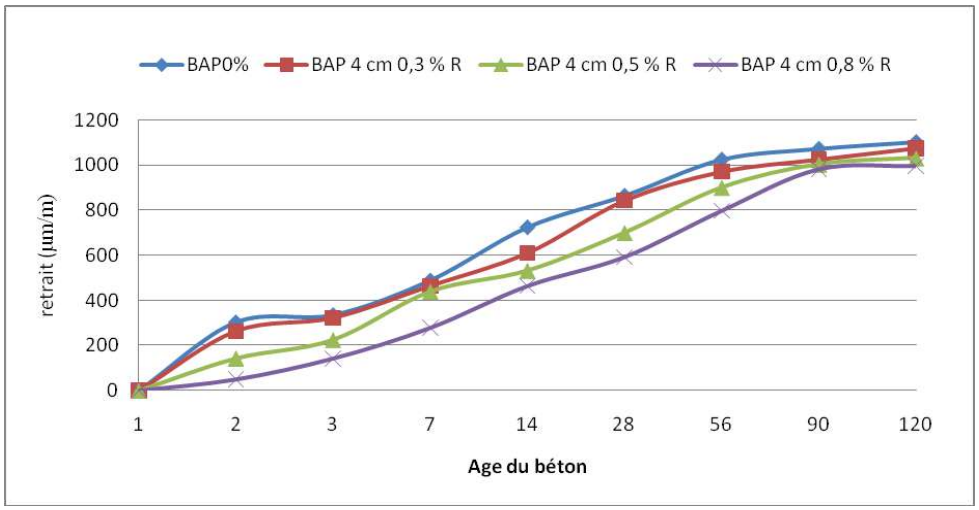


Figure.III.17: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 40 mm

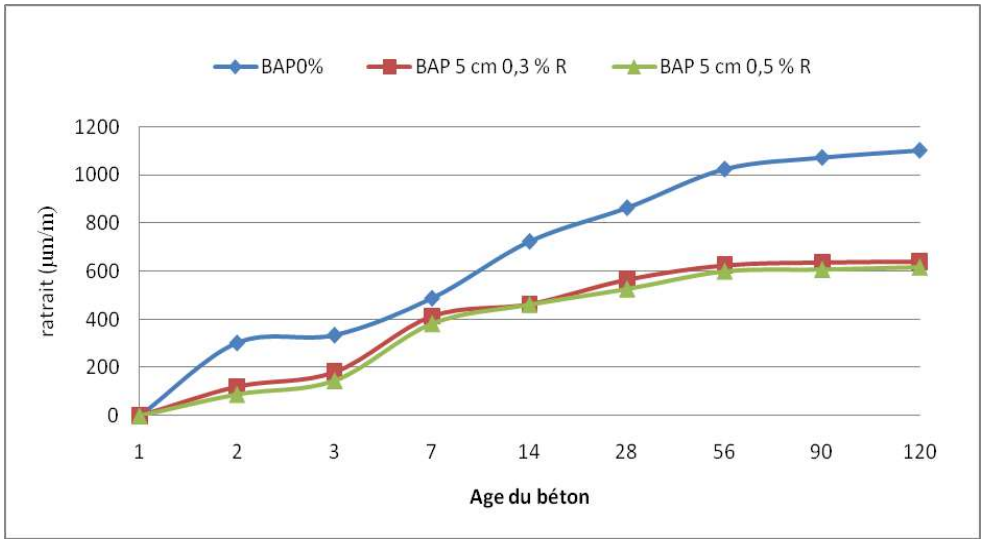


Figure.III.18: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPR 50 mm

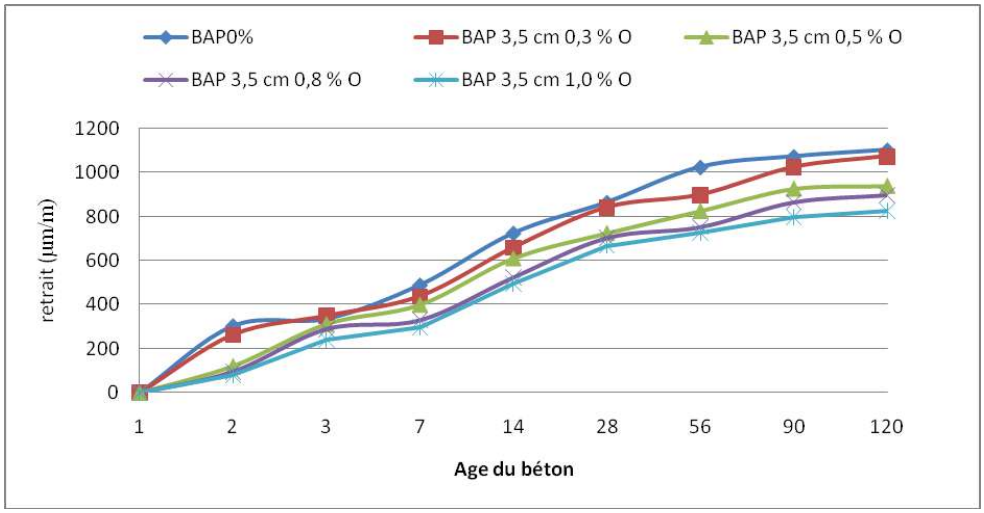


Figure.III.19: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 35 mm

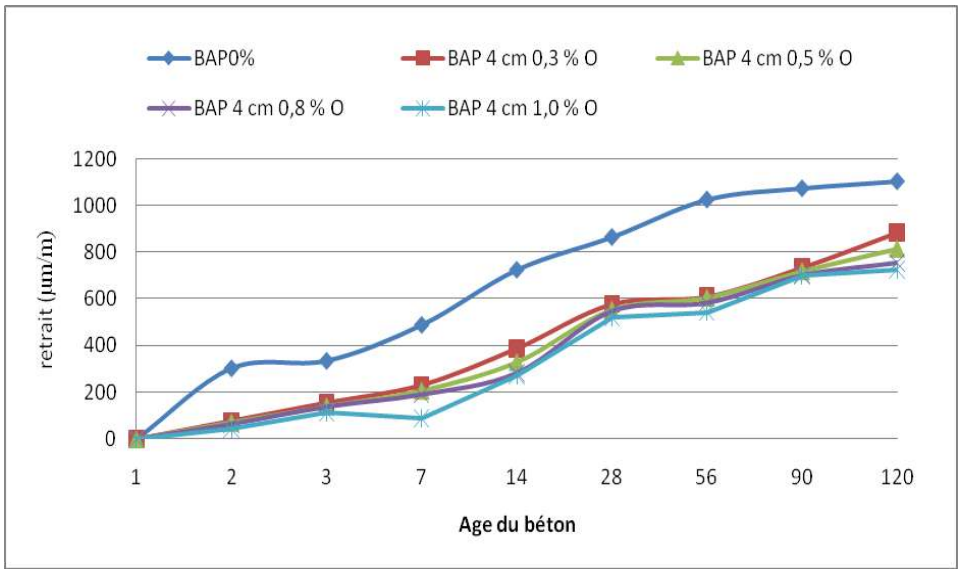


Figure.III.20: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 40 mm

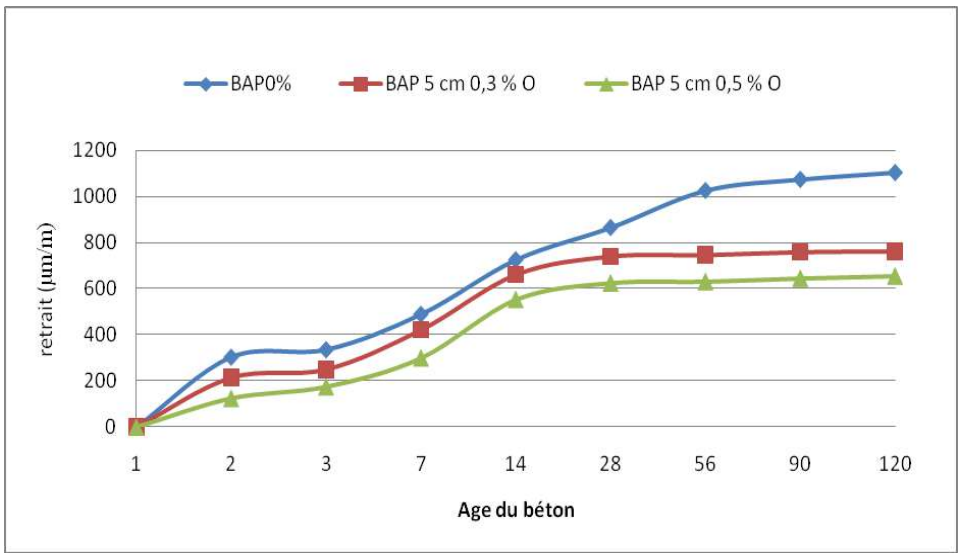


Figure.III.21: Retrait en fonction de l'âge du BAPFPO 50 mm

D'après les figures de retrait on peut dire que les fibres plastique quelque soit leurs formes rectilignes ou ondulées ayant un effet positif, plus on augmente la fraction volumique des fibres, plus le retrait diminue. La diminution varie entre 2.53 et 16.29 %, la plus petite amélioration correspond au béton de fibres ondulées de 35 mm avec 0.3% de volume de fibre, et la plus importante est relative au béton a base de fibres rectilignes de 50 mm de longueur et de 0.8% comme fraction volumique.

On constaté aussi que plus on augmente la longueur des fibres, quelque soit leurs forme, le retrait diminue.

Après une longue durée, l'action des fibres est plus précise. Car les Béton de fibres se stabilisent plus rapidement que le béton témoin. Comme on le constate sur les **figures III.16 III.17 III.18 III.19 III.20 III.21**. Nos résultats confirment ceux déjà obtenus par des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait **[121], [122], [123], [124]** : à savoir que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal. Cette réduction est affectée par plusieurs paramètres tels que :

- La durée de séchage ; les différences sont plus marquées après une durée plus importante (de 150jours) **[125]**
- La forme et la quantité de fibres semblent être les facteurs les plus importants qui dominent le retrait **[126], [127], [128]**. Les fibres longues sont plus efficaces.

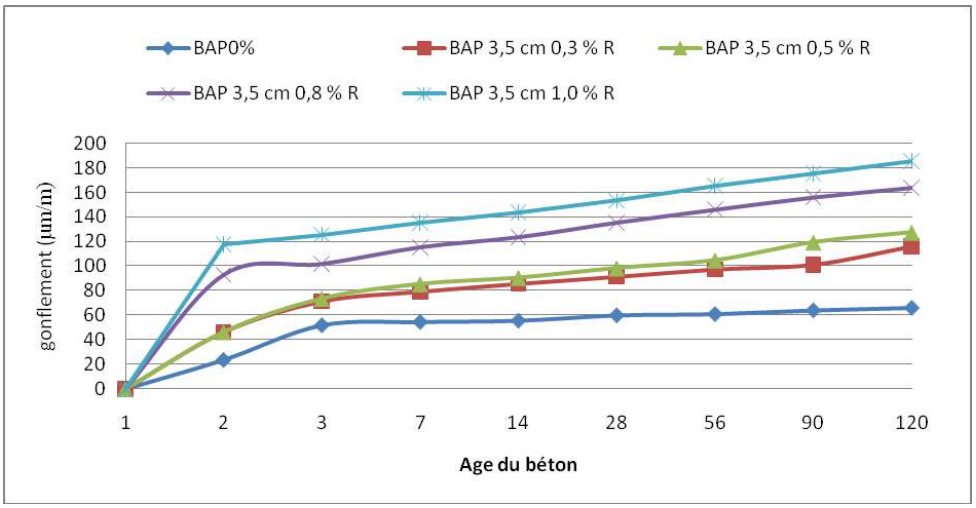


Figure.III.22: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm

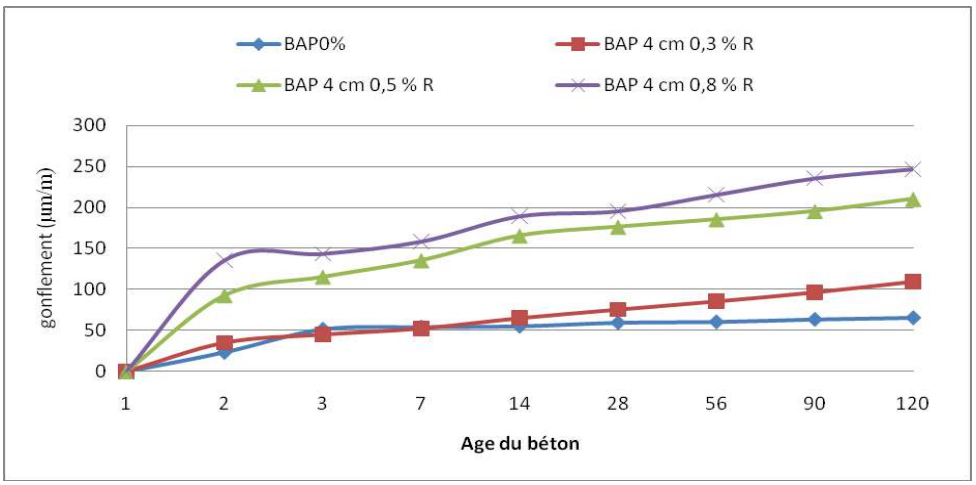


Figure.III.23: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 35 mm

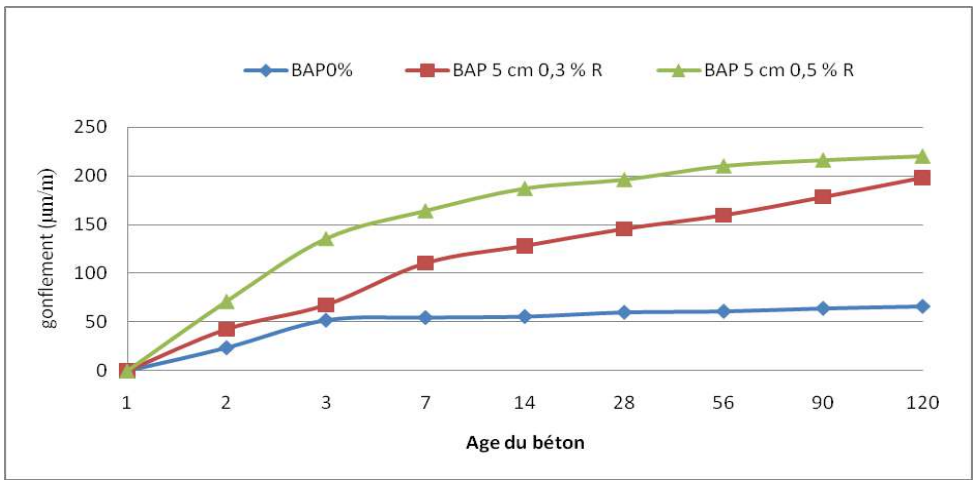


Figure.III.24: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPR 50 mm

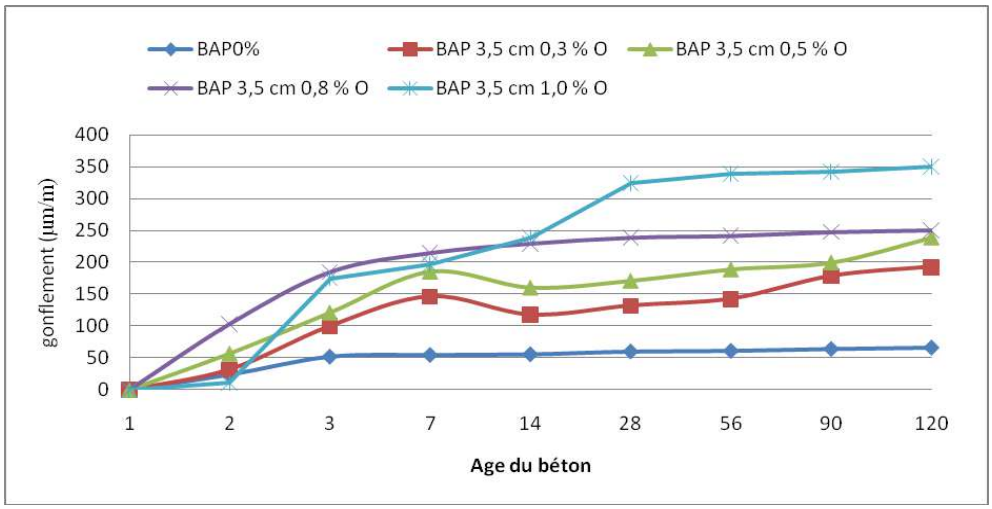


Figure.III.25: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 35 mm

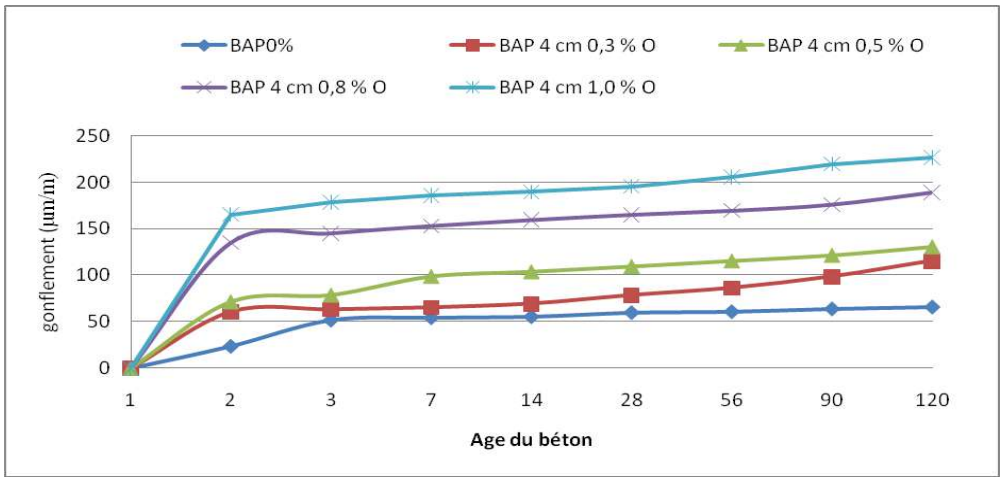


Figure.III.26: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 40 mm

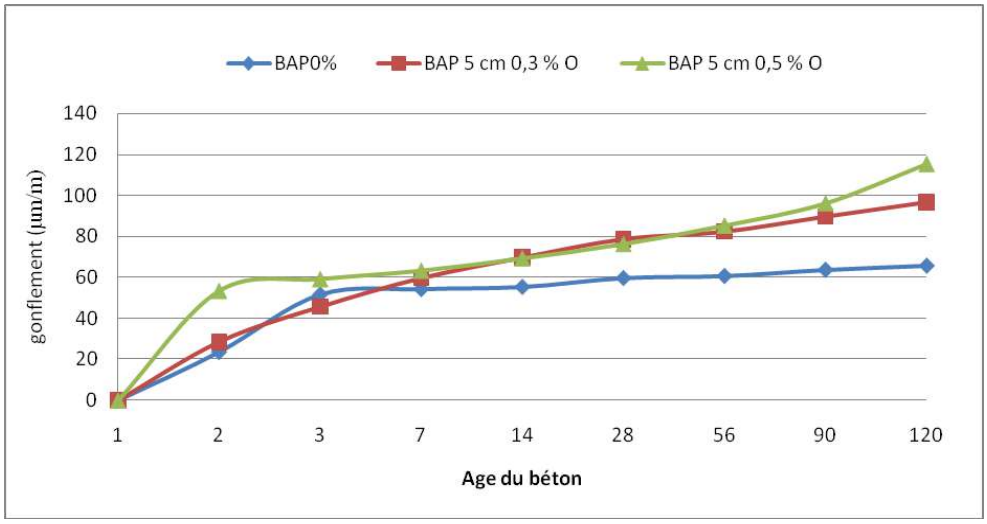


Figure.III.27: Gonflement en fonction de l'âge du BAPFPO 50 mm

D'après les **figures** de gonflement on peut dire que les fibres plastique quelque soit leurs formes rectilignes ou ondulées ayant un effet négatif, plus on augmente la fraction volumique des fibres, plus le gonflement augmente. L'augmentation varie entre 5.73 et 20.85%, la plus petite augmentation correspond au béton a base de fibres ondulées de 50 mm de longueur et 0.5% comme fraction volumique, et la plus importante est relative au béton de fibre ondulée de 35 mm avec un pourcentage de 1.0%.

III.3.5 L'absorption d'eau

Les figures suivantes présentent l'effet des fibres ondulées et rectilignes sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP

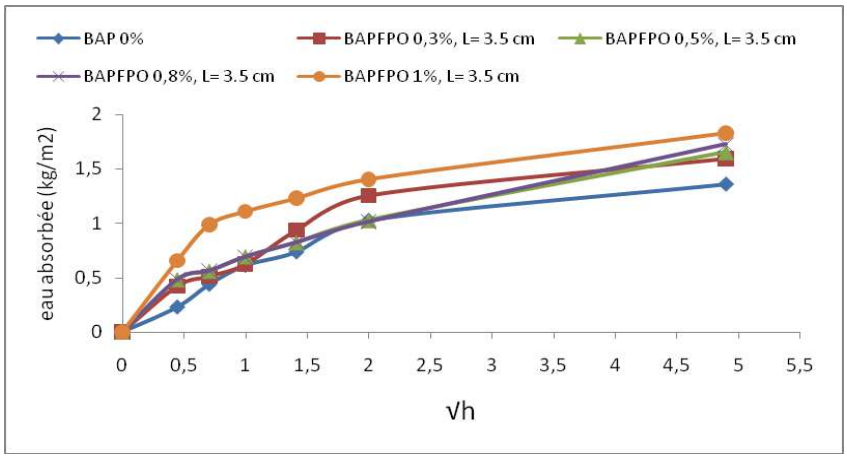


Figure.III.28: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 35 mm

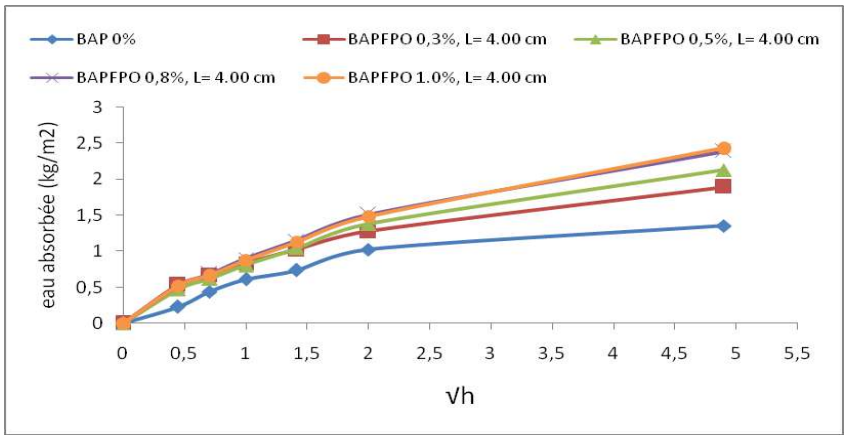


Figure.III.29: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 40 mm

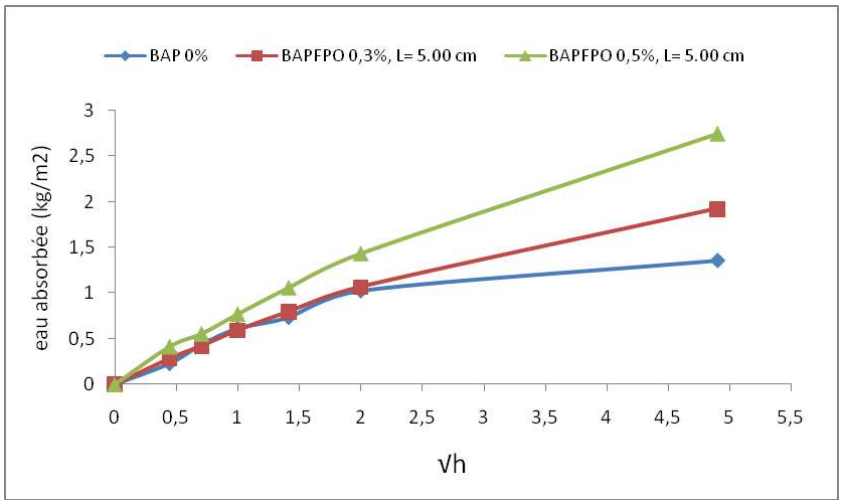


Figure.III.30: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPO 50 mm

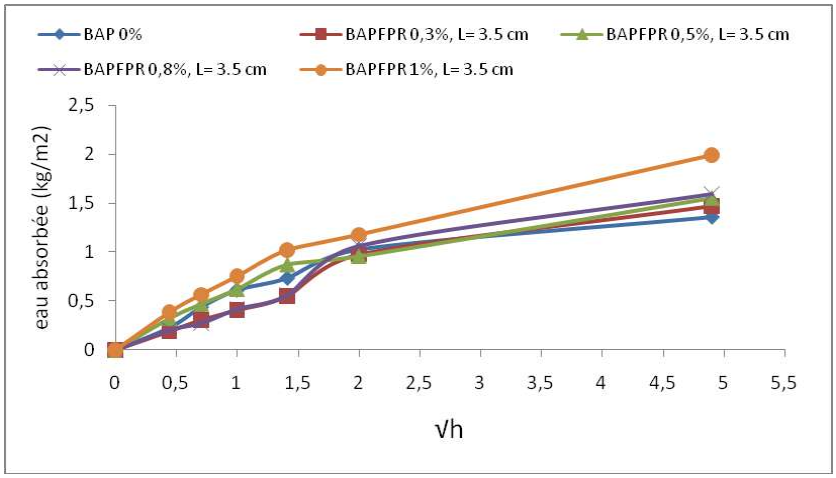


Figure.III.31: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 35 mm

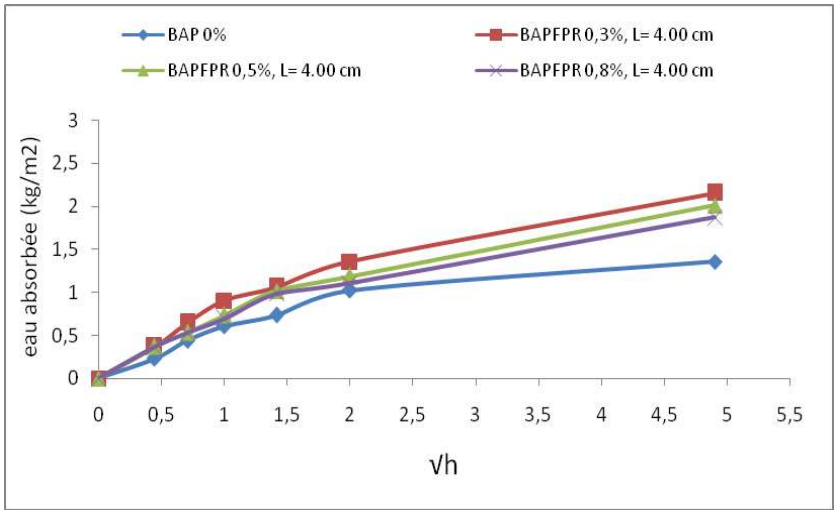


Figure.III.32: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 40 mm

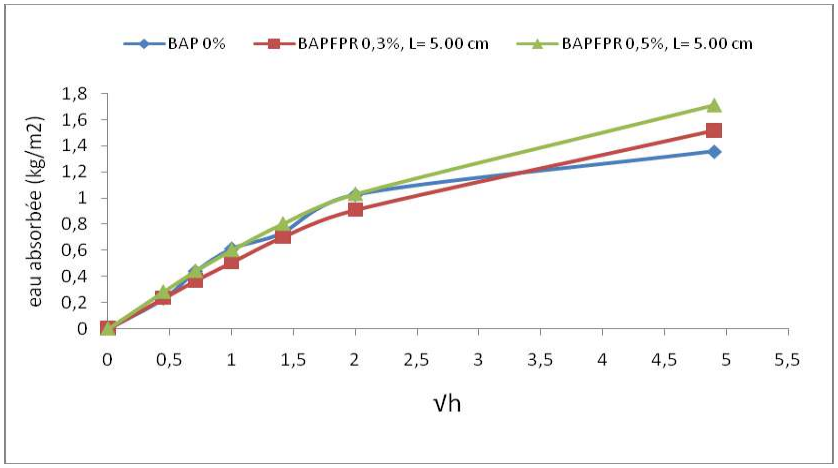


Figure.III.33: Absorption d'eau en fonction de rasine du temps BAPFPR 50 mm

On remarque que la capacité d'absorption d'eau du béton augment avec l'augmentation de dosages en fibres plastiques. Ainsi l'introduction de fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau, nos résultats vont dans le même sens ceux des travaux de **[122]**.

III.4 Conclusion

Ce chapitre décrit les résultats d'une étude expérimentale développée pour observer les effets de la longueur et de volume de la fraction de fibres sur le comportement des bétons autoplaçants et de répondre à la question dans quelle mesure ils affectent les propriétés des BAP à l'état frais et durci. A travers cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

Pour l'état frais :

- plus on augmente la fraction volumique l'étalement diminue et T_{500} augmente.
- plus on augmente la fraction volumique le temps de V-funnel augmente
- plus on augmente la fraction volumique le (H_2/H_1) augmente
- plus on augmente la fraction volumique la capacité de passage et de remplissage diminuent.
- plus on augmente la fraction volumique le risque de ségrégation augmente.

Sur la performance mécanique:

- La résistance à la compression des bétons autoplaçants renforcé par des fibres plastiques est légèrement supérieure par rapport au béton autoplaçant témoin, et elle est semblable après 90 jours de cure
- La résistance à la flexion est améliorée en fonction de l'augmentation de la longueur et de la fraction volumique de fibres
- Le module d'élasticité est amélioré en fonction de l'augmentation de la longueur et de la fraction volumique de fibres
- L'augmentation de la teneur en fibre mène à une réduction importante du retrait et augmentation du gonflement
- L'absorption par capillarité est augmentée par l'augmentation de la teneur en fibres

Sur la base, le béton à base des fibres ondulées de 40 mm de longueur utilisé avec une fraction volumique de 0.8% semble être le meilleur à l'état frais et durci et par suite il est for recommander aux utilisateurs des domaines du BTP.

CONCLUSIONS GENERALES

L'objectif de cette étude est d'étudier l'intérêt et l'influence des fibres plastiques (fromes rectilignes et ondulées) sur le comportement des BAP à l'état frais et durci. A la lumière des résultats obtenus on peut conclure que :

- A l'état frais
  - Les temps d'écoulement et d'étalement sont proportionnels avec le pourcentage de fibres introduit
  - La capacité de passage des bétons est faible
  - La capacité de remplissage au milieu confiné est faible car elle est affectée par l'incorporation des fibres
  - Bonne résistance à la ségrégation
- A l'état durci
  - Une légère augmentation de la résistance à la compression, tout en restant dans le marge des bétons résistants
  - Une augmentation remarquable de la résistance à la traction
  - Absorption d'eau par capillarité élevé
  - Diminution du retrait
  - Un gonflement élevé

Sur la base, le béton à base des fibres ondulées de 40 mm de longueur utilisé avec une fraction volumique de 0.8% semble être le meilleur à l'état frais et durci et par suite il est for recommander aux utilisateurs des domaines du BTP.

RECOMMANDATIONS

Dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre de cette recherche et sur la base des résultats importants trouvés, des travaux restent a mener dans plusieurs axes avec la valorisation de ce type de déchets plastiques (fibres plastiques) a savoir:

- Etudie de l'effet du diamètre des fibres sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants fibrés
- Etude de l'effet d'autres formes (autres que rectilignes et ondulées) sur le comportement des BAP
- Etude de l'influence de ce type de déchets sur d'autres types de béton (BPE, BHP, BCR, …)
- La valorisation d'autre type de déchets dans les BAP

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Khayat K., «Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation», p 479- 483, Eyrolles, 1997.

[2] Haddad O., 1er congres international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24,25 et 26 Mai 2004.

[3] Association Française de Génie Civil «AFGC», Bétons autoplaçants – Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.

[4] Ecoles Française du Béton (EFB), mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint- Lambert, Internet, 2004.

[5] Khélifa R., «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons, mémoire de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.

[6] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

[7] FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants, Bruxelles, août 2005.

[8] Abib Z., "formulations et caractérisation des bétons autoplaçants" Mémoire de Magister, Juillet 2004, U.S.T.H.B., 114 pages.

[9] Bethmont S. « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) Etude expérimentale des interactions granulaires » Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Décembre 2005.

[10] Dreux G. et Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.

[11] Comparet C., Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, «Etude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifians du béton», Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot, le 8 Octobre 2004.

[12] Flatt R.J. « Polymeric dispersants in concrete. In Polymers in particulate systems - Properties and applications » Marcel Dekker, Inc., 2002, 249 pages.

[13] Rols S., Ambroise J. and Péra J. "Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete" Cement and Concrete Research, 1999, vol 29, pp. 261-266.

[14] Lachemi M., Hossain K.M.A., Lambros V., Nkinamubanzi P.C. and Bouzoubaâ N. "Self-consolidating concrete incorporating new viscosity modifying admixtures » Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp. 917-926.

[15] Chopin D., « Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants – Optimisation du temps de fabrication », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juin 2003.

[16] Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.

[17] M. EL BARRAK « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais » Thèse de Doctorat de l'université toulouse III – Paul Sabatier, Juillet 2005, 228 pages.

[18] Lange F., Mörte H. and Rudert V. "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties" Cement and Concrete Research, 1997, vol 27, pp. 1481-1488.

[19] EFNARC « The European guidelines for self compacting concrete » The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, 2005, 68p.

[20] Sonebi M. and **Bartos P.J.M.** « Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete » Materials and Structures, 2002, Vol 35, pp. 462-469.

[21] Chapdelaine F. « Etude sur la mesure de la rhéologie du béton frais » Mémoire de Master (M.Sc.), 1998 Université de Laval, 126 pages.

[22] Couarraze, G. et **Grossiord, J.L.** « Initiation à la rhéologie » Lavoisier, Paris, 1983, pp 219.

[23] P. Domone, « The slump flow test for high-workability concrete", Cement and Concrete Research, vol 28. n°2, pp. 177-182, 1998.

[24] AFGC, «Les, Béton Autoplaçants»: Recommandations Provisoires Edition AFGC 2000.

[25] SCC, «*Guidelines Task 9, End Product*», Brite EuRam project BE 96-3801, Rational production and improved working environment through using SCC, February 2000.

[26] Thierry Serdan, « Les Béton Autonivelants (BAN) Synthèse Bibliographique», Liaison Labo P et Ch 196, PP 53-60, Mars-Avril1995.

[27] B.K. Van, D.G. Montgomery, I. Hinczak, K. Turner, «Rapid testing methods for segregation resistance and filling ability of self-compacting concrete», Proceedings of the fourth CANMET/ACI/JCI International Symposium: Advances in Concrete Technology, Tokushima, Japan, pp. 85-104, 1998.

[28] J. Ambroise , **S.Rols**, **J.Péra**, « *Self-leveling concrete – Design and properties*», Concrete Science and Engineering, 1, pp. 140-147, septembre 1999.

[29] Projet Région « Amélioration des constructions par la maîtrise des BAP » du Conseil Régional Midi-Pyrénées dans la thématique de recherche "l'homme et sa région", 131 p., 2005.

[30] BOUKNI Bariza tenue au feu des bétons autoplaçants Mémoire de magister université Mentouri Constantine décembre 2007.

[31] Burak Felekog¢, Selcuk Turkel, Bulent Baradan, "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete". Building and Environment 2003

[32] Assié S., Escadeillas G., Marchese G. and **Waller V.** « Durability properties of low-resistance self-compacting concrete » Magazine of Concrete Research, 2006, vol 58, pp. 1–7.

[33] Nassif H.H., Najm H. and **Suksawang N.** « Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC » Cement & Concrete Composites, 2005, vol 27, pp. 661–670.

[34] Persson B. « A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete » Cement and Concrete Research, 2001, vol 31, p. 193-198.

[35] Felekoglu B., Turkel S. and **Baradan B.** « Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete » Building and Environment, 2007, vol 42, pp. 1795–1802.

[36] Turcry P. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants- influence de la formulation » Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes, 2004, 213 pages.

[37] Gram H.E. and **Piparinen P.** "Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance" Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 211-225.

[38] S. Assié « Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.

[39] S. Assié., G. Escadellas, G. Marchese. « Durability of self-compacting concrete » 3rd International Symposium on Self Copacting concrete, pp 665-662, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.

[40] BOUKNI Bariza tenue au feu des bétons autoplaçants. Mémoire de magister université Mentouri Constantine décembre 2007.

[41] Sedran T., "Les bétons autonivelants - Synthèse bibliographique", Bulletin liaison des laboratoires des ponts et chaussées N°169, mars-av 1995, pp. 53-60.

[42] RILEM "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC", Edited by A. Skarendahl and O. Petersso, RILEM Publications, France, 2001.

[43] Sedran T. and **De Larrard F.** "Optimization of self compacting concrete thanks to packing model", Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, Suède, 1999, pp.321-332.

[44] De Larrard F. "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000.

[45] De Larrard F. and **Sedran T.** "Mixture-proportioning of high-performance concrete", Cement and Concrete Research, 2002, vol 32, pp.1699-1704.

[46] Bui V.K., Montgomery D., Hinczak I. and **Turner K.** "Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research, 2002, vol 32, pp.1489-1496.

[47] Bui V.K., Akkaya Y. and **Shah S.P.** "Rheological Model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal, Novembre-Décembre 2002, vol 99, pp.549-559.

[48] P.Turcy, A.Loukili « Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants, Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques», Revue Française de Génie Civil. Volume 7- n° 4/2003, pp 425-450.

[49] Jean-christophe Braquenier « Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[50] Gruewald, S., Performance based design of self compacting steel fiber reinforced concrete. 2004, Delft University of Technology: Netherlands. P. 233.

[51] SWAMY, R. H. S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S., Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers. The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1, 1984.

[52] Nilson, L., Reinforced Concrete with Sisal and other vegetable fiber. Swedish Council for Building Research, document D14, 1975.

[53] Ayyar, T.S.R. and Mirihagalla, P.K., Elephant grass fibers and reinforcing fiber.Magazine of Concrete Research , Vol. 28, pp.162-67, 1976.

[54] Coutts, R.S.P., Flax fibers as a reinforcement in cement mortar , the international journal of cement composites and lightweight concrete, vol.5 N°4,pp 257-262, 1983.

[55] Kriker. A., Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec . Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2005.

[56] Bledzki, A. K and **Gassan. J.**, Composites reinforced with cellulose based fibers, **Elsevier**, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.

[57] Khenfer, M. M. Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques. Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.

[58] Lacroix, R., Fuentes, A. et **Thonier, H.**, Traité de béton armé, Édition Eyrolles Paris, 1982.

[59] Quebaud M., 'Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats', Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

[60] A.C.I., Committee 215 "Considerations for design of concrete structures subjected to fatigue loading", A.C.I Journal, 1974 march, pp 97-121.

[61] A.C.I., Committee 506 "State of the art report on fiber reinforced shoTcrete" Concrete International and Design and Construction, 1984, vol. 6, N°12, pp. 15-27.

[62] Naaman A.E., (1985) "Fiber Reinforcement for Concrete," Concrete International: Design and Construction, Vol. 7, No. 3, pp 21-25.

[63] Aydin A.C., (2007) "Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete" Construction and Building Materials 21, pp.1149–1154.

[64] Romualdi J.P., Batson G.B., (1963) "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 89, No. EM3, pp 147-168.

[65] Durand G., "les bétons à base de fibres d'acier" *CERILH stage*26-02-1986 N° 6 p6 et *Annales N°347 Février* 1977 pp 48-49.

[66] Dardare J., " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés de fibres de polypropylène ", In : *fibre reinforced cement and concrete, RILEM*

[67] Poh W. " General creep-time equation." Journal of Materials in Civil Engineering.1998, Vol.10,n°2 p.118-120.

[68] De Larrard F., Fan D. (1992), BETONLAB - Logiciel d'aide à la formulation des bétons, Presses de l'ENPC, juin.

[69] Swamy R. N., Mangat P. S., (1974a), Compactibility of steel fibre reinforced concrete, Concrete, vol. 8, n°5, may, pp. 34-35.

[70] ACI (1982), State of the art report on fiber reinforced concrete, Committee ACi 544, Concrete International, vol. 4, n°5, pp. 9-30.

[71] Swamy R. N., Mangat P. S., (1974b), Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete, Cement and Concrete Research, vol. 4, n° 3, pp. 451 - 465.

[72] Bentur A., Mindess S. (1990), Fiber Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Sciences, London.

[73] Serna Ros P. (1984), Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement, Thèse de docteur ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[74] Baron J., Lesage R. (1969), Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques. Rapport de Recherche LPC n°3.

[75] Khenfer, M. M. Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques. Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.

[76] Tolëdo, F. R.D, Ghavami, K., Englan, D. G. L, Scrivener, K., Development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability. ELSEVIER, Cement and concrete composite, volume 25, p12, 2003.

[77] Mokhtari, F., Contribution à l'étude des composites à base de liants pouzzolaniques et de bambou. Thèse de docteur, INSA Lyon, 1991.

[78] Khenfer, M. M., Morlier, P., Caractérisation et microstructure des ciments renforcés de fibres de cellulose. Bulletin des L.C.P.C 224, Réf 4236, pp.49-58, Jan-Fev 2000.

[79] Tolëdo, F.R.D., Scrivener, K., England, G.L., Ghavami, K., Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites . **Elsevier**, Cement and concrete composite, volume 22, pp.127-143, 2000.

[80] Dhonde H.B., Mo Y.L., Hsu T.T.C., (2005) "Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams", Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project 0-4819 Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas December 2005.

[81] Groth P., (2000a) "Fibre reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on selfcompacting concrete and energetically modified binders, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology

[82] Grunewald S., (2004) "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete", Diplom-Ingenieur Delft University of Technology**.**

[83] Dhonde H.B., Mo Y.L., et **Hsu T.T.C et Vogel. J (2007)** "Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Fiber-Reinforced Concrete" ACI Materials Journal, V. 104, No. 5, pp. 491-500.

[84] Petersson, Ö., (1998) "Preliminary Mix Design", Final Report of Task 1, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Document RT1_v2.doc.

[85] Groth P., Nemegeer D., (1999) "The use of steel fibres in self-compacting concrete", First Int. Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Skarendahl and Petersson, RILEM publications PRO 7, Cachan, pp. 497-508.

[86] Alcantara M., (2004) Béton auto-plaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique, Thèse doctorat LMDC.

[87] Alcantara M., Mouret. M., Pons. G., Granju.J-L., (2005) "Self-compacting concrete with hybrid fiber reinforcement: workability and mechanical behaviour", 4 th International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Chicago, USA.

[88] Granju J-L., **Sabathier V.**, **Alcantara M.**, **Pons G.**, **Mouret M.**, (2004) "Hybrid fibre reinforcement of ordinary or self-compacting concrete", In: Proceedings PRO 39 of the Sixth International RILEM Symposium BEFIB, RILEM Publications, pp 1311–1320.

[89] Kawamata A., **Mihashi H**., **Fukuyama H.**, (2003) "Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement-based Composites", journal of advanced concrete technology vol.1, No.3, 283-290, November 2003

[90] Pons G., **Mouret M.**, **Alcantara M.**, **Granju J.L.**, (2007) "Mechanical behaviour of selfcompacting concrete with hybrid fibre reinforcement", Materials and structures, vol. 40, no2, pp. 201-210.

[91] NF EN 933-1, 1997. « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1:Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[92] NF EN 1097-6, 2001. « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[93] NF P 18-598, (Oct. 1991). « Granulats- Équivalent de sable »

[94] NF P18-555, (déc.1990). « Granulats- Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des sables ».

[95] NF EN 1097-3, 1998. « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

[96] NF EN 1097-2, 2001. « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 2: Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation », AFNOR.

[97] MEDAFLOW 145 Conforme à la norme AN 934-2 :TABB 1 , TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

[98] NF EN 12390-3, 2003, « Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes », AFNOR.

[99] NA427 ,1989 «Détermination de la résistance a la compression des éprouvettes»

Norme algérienne.

[100] NF P 18-412, 1981, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression.

[101] NF P 15-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989.

[102] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[103] Ding Y, Liu S, Zhang Y, Thomas A. The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete. Constr-Build-Mater 2008;22(7):1462–70.

[104] Elie Awwad, Mounir Mabsout, Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers, Cons- Build-Mate 35 (2012) 710–717.

[105] Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibers in fresh and hardened state. Constr- Build- Mater 2008;22:956–65.

[106] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, Const-Build-Mater-55 (2014) 274–288.

[107] Bensaid Boulekbache, Mostefa Hamrat, Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, Const-Build-Mater 24 (2010)1664–1671.

[108] Kawamata A., Mihashi H., Fukuyama H., (2000) "Flexural failure properties of hybrid fiber reinforced cementitious composites", proceeding of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting, No.63, 69-72.

[109] **Domagała L**. Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres. J Civ Eng Manage 2011;17(1):36–44.

[110] Kayali O, Haque MN, Zhu B. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. Cem-Concr-Compos 2003;25(2):207–13.

[111] Bilodeau A, Kodur VKR, Hoff GC. Optimization of the type and amount of polypropylene fibers for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. Cem-Concr-Compos 2004;26:163–74.

[112] Shafigh P, Mahmud H, Jumaat MZ. Effect of steel fiber on the mechanical properties of oil palm shell lightweight concrete. Mater-Des 2011;32:3926–32.

[113] Valeria Corinaldesi, Giacomo Moriconi, Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions, Cem-Conc-Comp 33(2011) 596–601.

[114] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello, Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, Const-Build- Mater 36 (2012) 46–57.

[115] Elie Awwad, Mounir Mabsout, Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers, Cons- Build-Mate 35 (2012) 710–717.

[116] Mahmoud Hassanpour, Payam Shafigh, Hilmi Bin Mahmud, Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review, Cons-Build-Mate 37 (2012) 452–461.

[117] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, Const-Build-Mater-55 (2014) 274–288.

[118] Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibers in fresh and hardened state. Constr- Build- Mater 2008;22:956–65.

[119] Bensaid Boulekbache, Mostefa Hamrat, Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, Const-Build-Mater 24 (2010)1664 1671.

[120] Kawamata A., Mihashi H., Fukuyama H., (2000) "Flexural failure properties of hybrid fiber reinforced cementitious composites", proceeding of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting, No.63, 69-72.

[121] Edgington J., Hannant D.J., Williams R.I.T, Steel fiber reinforced concrete. », G.B. Building 1974.

[122] Elhachem M., « Etude de l'influence de la fibre de fonte amorphe sur le retrait et le fluage du béton », Thèse Doct., Ecole Centrale Paris, 1990, 165p.

[123] Houari H., Etude de l'influence de la fibre métallique sur le fluage et la fatigue du béton, Séminaire National de Génie Civil, Guelma, Algérie, 24-25 Oct. 1994, 10p.

[124] Arabi. N, Redel. B, Melinge. Y, Jauberthie.R. International "Alkali resistant glass fibre reinforced cementations materials for patching applications" Proceedings of 1st Concrete Conference one to repair, France 15-17 JULY? 2003.

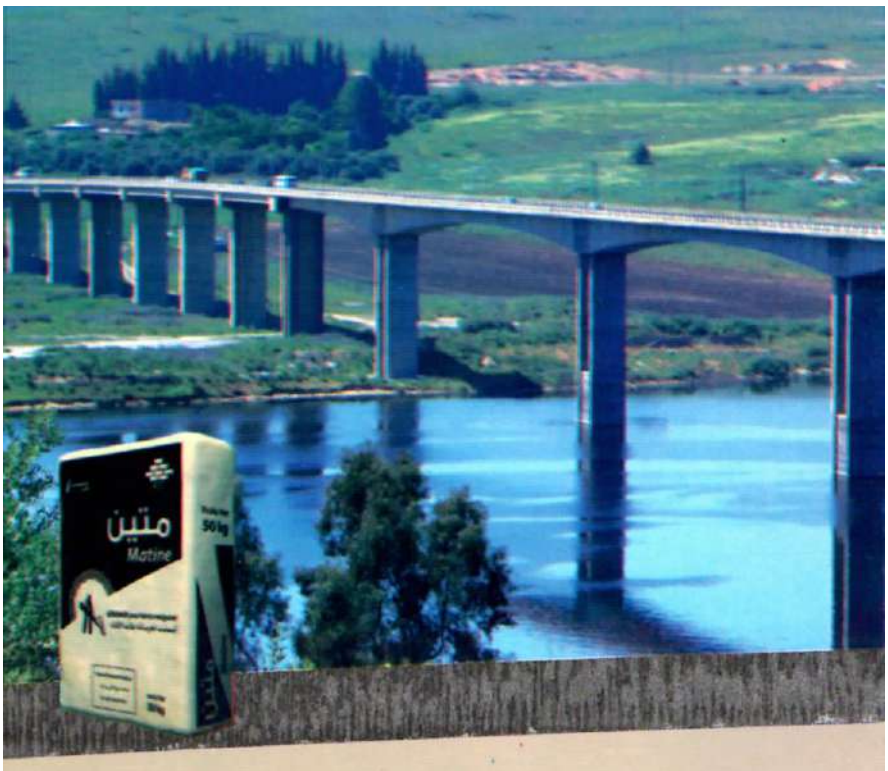
[125] Balaguru P., Ramakrishnan, Fibre reinforced concrete properties : Workability-Behaviour under long term loading-and Air-Void Characteristics , 1987, Vol.20, N°118, pp.283292.

[126] Swamy. R.N, Stravrides. H, Some properties of high workability steel fiber concrete. Sheffield 1975.

[127] Mangat P.S, Azari M.M, A theory for the free shrinkage of steel reinforced cement matrices, Journal of Materials Sciences, 1984, Vol. 19, pp.2183-219

[128] Dupin.R, Lanchon.R Aggregates, grounds, cements and concretes" Editions Casteilla 75005 PARIS 1995, pp 122-136.

Fiche technique du ciment



Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.

	CIMENT	SABLE (sec)	GRAVILLONS (sec)	EAU (litres)
Ouvrage simple en béton armé (B30)	x1	+	+	+ 25ℓ

Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en œuvre.

≈ 10ℓ ≈ ≈ 60ℓ

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), **(NA 5042)**:	1.5– 3.0
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(NA 5042)**:	2.00 – 2.50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
Teneur en chlorures (%), **(NA 5042)**:	0,01 – 0,03

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

NOTICE TECHNIQUE 1101

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 :TAB 1 ,TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme .....Liquide
- Couleur .....brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec .....30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR** .

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Précaution d'emploi:
Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur notre site web : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

C. Exemple de calcul de la composition du béton

C.1 Les données

Pour un volume de béton de volume V=33 litres

Masses volumiques

- Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : ρ_G =1373kg/m^3
- Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : ρ_{AG} = 2666kg/m^3
- Masse volumique absolue du sable : ρ_S = 2631kg/m^3
- Masse volumique absolue du ciment : ρ_C =3150kg/m^3

Coefficients d'absorption

- Coefficient d'absorption du sable : A_{bS} = 0.6
- Coefficient d'absorption du gravier : A_{bG} = 2.22
- Le rapport Sable/Mortier : S/M = 0.45
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de : $$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$
- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : A=1% du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de E/C_{volume}=1.26 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volume} / \rho_C = 0.40$ par unité de poids de ciment
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW145**) : %Sp= 0.9% du poids de ciment, le **MEDAFLOW145**

C.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse M_1 et un échantillon de gravier de masse M'_1 et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse M_2 et M'_2 les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable : $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$

L'humidité du gravier : $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$

C.3 Calcul des différents composants

C.3.1 Gravier

La quantité **G** en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

C.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (**%G**), le pourcentage du mortier par rapport au béton (**%M**) puis le pourcentage du sable dans le béton (**%S**) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (**S**) :

Le pourcentage du gravier dans le béton :

$$\%G = \frac{G(kg/m^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable **S** en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100}\right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

C.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (**%P**) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (**%C**) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E / C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment **C** en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

C.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton **Sp** (kg/m^3)

$$Sp(kg/m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplastifiant **Sp** en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

C.3.5 Eau

L'eau ajoutée au béton (**E**) est divisée en deux partie : la première partie (**E_1**) est de 70% de (**E**) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (**E_2**), elle de 30% de (**E**) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (**%E**) :

$$\%E = \frac{E/C_{volume}}{1+E/C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenue dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(\frac{\mu_S - A_{bS}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(\frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

L'eau contenue dans le superplastifaint : e_3

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire: e

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume Vde béton :

$$\boxed{E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e}$$

Avec :

Eau1 $E_1(kg) = 0.70 \times E$

Eau2 $E_2(kg) = 0.30 \times E$