REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Université Dr. YAHIA FARES DE MEDEA

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 de Master en Génie Civil

Option : construction et matériaux

Thème

BÉTON AUTOPLACANT RENFORCÉ PAR DES FIBRES MÉTALLIQUES

Réalisé par les étudiants :

- ***Mr. BENTEGRI Djaafar***
- ***Mr. RABEHI Chaouki***

Encadré par :

- ***DR. DEBIEB Farid***
- ***Mr. IRKI Ilyes***

Promotion 2012-2013

Remerciements :

Au terme de ce travail nous tenons à faire louange à« DIEU » qui nous a donné la force d'achever cette réalisation.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur et Co-promoteur : Mr. DEBIEB Farid et IRKI Ilyes, pour leurs conseils et leurs aides précieux.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Nos gratitudes à tous les membres de jury qui nous ont font l'honneur de juger notre travail.

DEDICACES

Je Dédie ce travail:

Auxêtres qui me sont les plus chers au monde, mon père et ma mère, en témoignage de ma profonde affection et de ma vive reconnaissance pour tous les sacrifices consentis à mon égard, et surtout leurs confiances et patience.

- ✓ *Mes chers frères Mohamed et Moussaad et à toute ma famille.*
- ✓ *Tous mes professeurs et à tous les enseignant du département de génie civil.*
- ✓ *Tous mes amis qui me connaissent.*
- ✓ *Et aussi pour mon cher binôme Shaouki.*

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

BENTEGRI. Djaafar

DEDICACES

Je Dédie ce travail:

Auxêtres qui me sont les plus chers au monde, mon père et ma mère, en témoignage de ma profonde affection et de ma vive reconnaissance pour tous les sacrifices consentis à mon égard, et surtout leurs confiances et patience.

- ✓ *Mon cher frère Mohamed.*
- ✓ *Mes chères sœurs, Soumia et Nasma.*
- ✓ *Mon cousin Ahmed Toumi.*
- ✓ *Mes chères cousines, Hakima, Nana Mes oncles, tontes : Youcef, Nonrdin, Djamel, Wahiba ,Khdidja, Cherifa, Chafika*
- ✓ *Mes prof Ms DEBIEB, Ms IRKI, Md BOUKHALKHAL,Md SATARI*
- ✓ *Tous mes amis de l'université : Hicham, Oussama, Malik, Amin*
- ✓ *Mon chère binôme DJAAFAR*
- ✓ *Mes amis Azzdin, Mansour, Mahiedin, Hsan, Bilal, Foad, Mohamed, Imad, Hamza, Nordin*
- ✓ *A tous que me connaitre,*
- ✓ *A mes camarades d'auditoires et tous ceux de la faculté du génie civil.*

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

RABEHI. Chaouki

Résumé

Parmi les principaux défauts du matériau béton est sans doute sa fissuration et, par voie de conséquence, sa faible résistance à la traction. Pour surmonter cette insuffisance, des recherches très importantes sont en cours dans beaucoup de laboratoires afin d'armer le béton à l'aide des fibres métalliques.

Dans ce contexte, ce projet à pour but de contribuer à la valorisation des déchets métalliques dans le béton autoplaçant. Deux types de fibres métalliques industrielles sont utilisés avec un pourcentage volumique de 0,3% et 0,5%.

Les propriétés à l'état frais (ouvrabilité, air occlus), et durci (résistance à la compression, résistance à la traction, retrait et absorption d'eau) des différents bétons réalisés sont analysées et comparées avec le béton naturel (témoin).

Abstract

Among the main drawbacks of the concrete material is without doubt its own fissure and, consequently, its low resistance to the traction. To overcome this insufficiency, very important researches are underway in many laboratories in order to arm the concrete with metal fibers.

In this context, this project aims to contribute to the valorization of metal waste in the self-compacting concrete. Two types of industrial metal fibers are used as a percentage by volume of 0.3% and 0.5%.

Fresh state properties (workability, air-entrained), and the hardened (resistance to compression, tensile strength, shrinkage and water absorption) of various concretes made are analyzed and compared with a natural one (witness).

الملخص

من العيوب الرئيسية لمادة الخرسانة هي بدون شك انشقاقها، و بالتالي ضعف مقاومتها للتمدد. للتغلب على هذا القصور، تجري حاليا بحوث مهمة في العديد من المختبرات من أجل تسليح الخرسانة بالألياف المعدنية.

في هذا السياق، يهدف هذا المشروع إلى المساهمة في استرجاع المعادن الخردة واستعمالها في الخرسانة ذاتية الانضغاط. تم استخدام نوعين من الألياف المعدنية مصنعة بنسبة حجمية تقدر ب 0.3٪ و 0.5٪ .

يتم تحليل خصائص لكل من الحالة الطازجة (قابلية، ومحتوى الهواء)، الحالة الصلبة (قوة الضغط، الشد، الانكماش وامتصاص الماء) ومقارنتها مع الخرسانة الطبيعية (الشاهد) .

Sommaire

Introduction Générale…… 2

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.

I.1. Introduction…… 5

I.1.1. Matériau béton…… 5

I.1.1.1. Définition…… 5

I.1.1.2.Types de bétons…… 6

I.1.1.3. Propriétés du béton…… 8

I.1.1.4. Constituants du béton…… 13

I.1.1.5. Formulation du béton…… 26

I.2. Bétons autoplaçants (BAPs)…… 27

I.2.1. Historique…… 27

I.2.2. Définition…… 27

I.2.3. Concept du béton autoplacant (BAP)…… 28

I.2.4. Constituants d'un BAP …… 29

I.2.4.1. Eau…… 30

I.2.4.2. Ciment…… 30

I.2.4.3. Granulats…… 31

I.2.4.4. Additions minérales…… 32

I.2.4.5. Superplastifiants…… 34

I.2.4.6. Agent colloïdal ou de viscosité…… 44

I.2.5. Modes de formulation des BAPs…… 44

I.2.5.1. Cahier de charge minimum à l'état frais…… 45

I.2.5.2. Particularité de la composition Des BAPs…… 46

I.2.5.3. Quelques points à surveiller…… 50

I.2.6. Pratique actuelle de la formulation des BAP…… 50

I.2.7. Approches de formulation des BAPs..... 51
I.2.7.1. Approche basée sur l'optimisation des mortiers..... 51
I.2.7.2. Méthode basées sur l'optimisation du volume de pate..... 52
I.2.7.3. Méthode basées sur l'optimisation squelette granulaire..... 53
I.2.7.4. Méthode basé sur un plan d'expérience..... 53
I.2.7.5. Principe et application des approches..... 54
I.2.8. Propriétés principales d'un béton à l'état frais..... 58
I.2 .8.1. Remplissage..... 58
I.2.8.2. Résistance à la ségrégation..... 59
I.2.8.3 Caractéristiques rhéologiques fondamentales Des BAPs 59
I.2.8.4 Essais de caractérisation sur bétons autoplaçants..... 60
I.2.9. Propriétés du béton à l'état durci..... 65
I.2.9.1. Résistance à la compression..... 65
I.2.9.2. Résistance à la traction..... 66
I.2.9.3. Module d'élasticité..... 66
I.2.9.4. Retrait..... 67
I.2.9.5. Fluage 68
I.2.10. Mise en œuvre du béton 68
I.2.10.1 Méthodes de mise en œuvre des BAPs..... 68
I.3. Bétons fibrés..... 70
I.3.1. Fibres..... 70
I.3.1.1. Introduction..... 70
I.3.1.2. Définition des fibres..... 71
I.3.1.3. Différents types de fibres..... 72
I.3.1.4. Propriétés mécaniques des fibres..... 73
I.3.1.5. Critère de choix du type de fibres..... 73
I.3.2. Composition des bétons de fibres..... 75
I.3.2.1. Critère de choix du type de fibres 75
I.3.2.2. Béton renforcé de fibres en phase d'hydratation..... 77
I.3.3. Influence du dosage en fibres..... 77
I.3.3.1. Optimisation rhéologique 77
I.3.3.2. Optimisation mécanique..... 77

I.3.4. Influence de l'orientation préférentielle des fibres..... 78
I.3.5. Rôle des fibres..... 79
I.3.6. Principe d'action des fibres..... 80
I.3.7. Comportement mécanique des bétons renforcés de fibre..... 82
I.3.7.1. Résistance à la compression..... 82
I.3.7.2. Résistance à la flexion..... 83
I.3.7.3. Comportement en traction..... 84
I.3.7.4. Comportement en fatigue..... 85
I.3.8. Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres..... 87
I.4. Bétons Autoplaçants Fibrés (BAPFs)..... 88
I.4.1. Introduction..... 88
I.4.2. Propriétés des Bétons Autoplaçants Fibrés à l'état Frais..... 89
I.4.2.1. Essai de l'étalement..... 89
I.4.2.2. Essai de V-funnel..... 90
I.4.2.3. Essai J-RING..... 91
I.4.2.4 .Résistance à l'écoulement..... 91
I.4.3. Orientation et la distribution des fibres..... 92
I.4.4. Comportement mécanique des Bétons Autoplaçants Fibrés..... 93
I.4.4.1. Comportement à la flexion..... 93
I.4.4.2 Comportement à la compression et à la traction..... 95
I.4.4.3. Retrait..... 96
I.4.5. Utilisation des BAPFs dans les structures..... 96
I.4.5.1. Palplanches..... 96
I.4.5.2. Voussoirs..... 99
I.4.5.3. Eléments poutres..... 99

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS.

II.1. Introduction..... 101

II.2. Caractérisation des matériaux utilisés..... 102

II.2.1. Ciment..... 103

II.2.2. Granulats 103

II.2.2.1. Sable..... 103

II.2.2.2. Gravier..... 104

II.2.3. Eau de gâchage 106

II.2.4. Superplastifiant..... 106

II.2.5. Fibres métalliques..... 107

II.2.5.1. FIBRES 1..... 107

II.2.5.2. FIBRES 2..... 108

II.3. Formulation du béton..... 109

II.4. Technique expérimentale..... 111

II.4.1. Séquence de malaxage du béton..... 111

II.4.2.1. Essais d'étalement et T_{50} 113

II.4.2.2. Essai J-Ring..... 114

II.4.2.3. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) frais..... 116

II.4.2.4. Essai de la boîte en U (U-Box)..... 117

II.4.2.5. Essai de stabilité au tamis..... 118

II.4.2.6. Essai de la boîte en L (L-Box) 119

II.4.2.7. L'air occlus 120

II.4.2.8. Densité..... 121

II.5. Démoulage et conservation des éprouvettes..... 122

II.6. Béton durci 123

II.6.1. Essai ultrasonique..... 123

II.6.2. Essai scléromètrique..... 124

II.6.3. Résistance à la compression..... 126

II.6.4. Résistance à la traction par flexion..... 128

II.6.5. Retrait..... 129

II.6.6. Gonflement…… 130

II.6.7. Absorption d'eau…… 133

II.7. Conclusion…… 133

CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS

III.1. Introduction …… 135

III.2. Essais sur un béton à l'état frais…… 135

III.2.1. Effet des fibres métalliques sur la capacité de passage et T_{50} du BAP et la différence des hauteurs (J-Ring)…… 136

III.2.2. Effet des fibres métalliques sur le temps d'écoulement des BAP à travers V-funnel…… 139

III.2.3. Effet des fibres métallique sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U-Box)…… 140

III.2.4. Effet des fibres métallique sur le taux de remplissage des BAP à travers L-BOX …… 140

III.2.5. Effet des fibres métalliques sur la densité des BAP…… 141

III.2.6. Effet des fibres métalliques sur l'air occlus des BAP…… 142

III.2.7. Effet des fibres métalliques sur la stabilité au tamis…… 142

III.3. Essais sur un béton durci…… 143

III.3.1. Mesure de la résistance on se reposant sur l'essai ultrasonique …… 143

III.3.2. Effet des fibres métalliques sur la résistance à la compression du BAP…… 144

III.3.3. Effet des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion du BAP…… 145

III.3.4. Effet des fibres métalliques sur retrait et gonflement BAP…… 146

III.3.5. Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP…… 147

III.4. Conclusion…… 148

Conclusion générale…… 150

Recommandations…… 152

Références bibliographiques…… 154

Annexe..... *163*

LISTE DES FIGURES.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.		
Figure №	Titre de la figure :	Page №
Figure I.1	Structure hétérogène du béton.	6
Figure I.2	Essai d'affaissement au cône d'Abrams.	9
Figure I.3	Mesure de l'affaissement.	9
Figure I.4	Béton frais.	10
Figure I.5	Essai de traction par flexion.	12
Figure I.6	(a) Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. (b) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.	29
Figure I.7	Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier.	33
Figure I.8	Les utilisations des superplastifiants.	34
Figure I.9	Déférentes classes des superplastifiants.	35
Figure I.10	Schéma général des co-polymères.	36
Figure I.11	Représentation schématique de la formule de polycarboxylate.	36
Figure I.12	Schéma des forces exercées entre un ensemble de particules de ciment sur lesquels sont adsorbés des copolymères de polycarboxylates avec des chaînes PEO.	37
Figure I.13	Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique.	38
Figure I.14	Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polysulfonate.	40
Figure I.15	Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.	40
Figure I.16	. Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polycarboxylate.	41
Figure I.17	Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.	41
Figure I.18	Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.	42
Figure I.19	Compatibilité ciment/superplastifiant/sulfate de calcium.	43
Figure I.20	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle.	46

Figure I.21	*Volume de pâte relatif au BAP est différent de BV.*	*47*
Figure I.22	*Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un.*	*47*
Figure I.23	*Interaction entre l'eau et les polysaccharides.*	*48*
Figure I.24	*Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant*	*49*
Figure I.25	*Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats.*	*52*
Figure I.26	*Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.*	*54*
Figure I.27	*Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D. La flècheindique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants .Le couple optimal est indiqué par un cercle.*	*56*
Figure I.28	*Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de bétons.*	*60*
Figure I.29	*Mesure de l'étalement.*	*61*
Figure I.30	*La boîte L-BOX*	*61*
Figure I.31	*Mesure du taux de remplissage (H2/H1 ≈ 80%).*	*62*
Figure I.32	*Tamis de 5mm + fond - Mesure de la laitance.*	*62*
Figure I.33	*Essai J-ring.*	*63*
Figure I.34	*Test à l'entonnoir (V-funnel/ Orimet).*	*63*
Figure I.35	*Essai à la boîte en U (ou U-box).*	*64*
Figure I. 36	*Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF).*	*65*
Figure I.37	*Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.*	*66*
Figure I.38	*Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèleréglementaire et un modèle d'homogénéisation.*	*67*

Figure I.39	*Retraits des BAP B1 (E/C=0,50), BAP J(E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45).*	*67*
Figure I.40	*Différentes formes géométriques de fibres métalliques.*	*74*
Figure I.41	*Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion.*	*78*
Figure I.42	*Illustration de l'apport du renfort par des fibres.*	*80*
Figure I.43	*Processus de fissuration du béton.*	*81*
Figure I.44	*Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite.*	*81*
Figure I.45	*Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières).*	*83*
Figure I.46	*Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (avec des précautions particulières).*	*84*
Figure I.47	*Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée, pou une fibre fonctionnant par ancrage de forme (BFM1 : fibres à crochets en acier tréfilé -longueur 60 mm, diamètre 0,8 mm- dosées à 50 kg/m3; f c = 27,5MPa) et une*	*84*
Figure I.48	*Contribution des fibres dans le comportement à la traction.*	*85*
Figure I.49	*Courbe de Wöhler.*	*86*
Figure I.50	*Quelques signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue.*	*86*
Figure I.51	*Processus de couture :* *a) Influence des fibres courtes dans le processus decouture des microfissures.* *b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures.*	*87*
Figure I.52	*Effets des fibres sur l'étalement des BAP.*	*89*
Figure I.53	*L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre.*	*90*
Figure I.54	*L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres.*	*90*
Figure I.55	*Illustration de la consistance de pates de ciment renforcées avec des fibres de facteurs d'aspect et concentrations différent (a) _f = 5% et r = 17, (b) _f = 20% et r = 17, (c) _f = 5% et r = 80.*	*93*
Figure	*Courbe effort-flèche pour différentes compositions.*	*94*

I.56		
Figure I.57	*Comportement à la traction de différentes compositions.*	*95*
Figure I.58	*Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b)*	*97*
Figure I.59	*Un voussoir à base de BAP fibré.*	*98*
Figure I.60	*Photographie aux rayons X au milieu du voussoir le long de l'écoulement (a), Perpendiculairement à l'écoulement (b)*	*98*

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS.		
Figure №	Titre de la figure :	Page №
Figure II.1	Le ciment utilisé.	103
Figure II.2	Sable de Bouguezoul.	103
Figure II.3	Analyse granulométrie de sable de Bouguezoul.	104
Figure II.4	Gravier de Mont Guorno 3/8.	105
Figure II.5	Gravier de Mont Guorno 8/15.	105
Figure II.6	Analyse granulométrie du gravier 3/8 et 8/15.	106
Figure II.7	(PC) MEDAFLOW 30.	107
Figure II.8	fibres industrielles RC-80/50.	107
Figure II.9	fibres industrielles FI50.	109
Figure II.10	Séquence de malaxage du béton autoplaçant.	112
Figure II.11	Développement de l'essai d'étalement.	114
Figure II.12	Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure des hauteurs.	115
Figure II.13	Protocole de l'essai du J-Ring.	115
Figure II.14	Dimensions de l'entonnoir en V (V-funnel).	116
Figure II.15	Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel).	117
Figure II.16	Dimensions de la boîte en U (U-Box).	117
Figure II.17	Protocole de l'essai de la boîte de U (U-Box).	118
Figure II.18	Protocole de l'essai de stabilité au tamis.	119
Figure II.19	Protocole de l'essai de L-Box.	119
Figure II.20	Protocole de l'essai de la boîte de L-Box.	120
Figure II.21	Aéromètre à béton.	121

Figure II.22	*Mesure de la densité du béton.*	*121*
Figure II.23	*Conservation des éprouvettes.*	*122*
Figure II.24	*Étalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.*	*124*
Figure II.25	*Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline.*	*124*
Figure II.26	*Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.*	*124*
Figure II.27	*Scléromètre.*	*125*
Figure II.28	*Essais scléromètrique.*	*125*
Figure II.29	*Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes.*	*126*
Figure II.30	*Presse hydraulique (2000 kN).*	*127*
Figure II.31	*Essai de compression.*	*128*
Figure II.32	*Essai de traction par flexion.*	*129*
Figure II.33	*Réctractomètre.*	*130*
Figure II.34	*Etalonnage de l'appareil.*	*131*
Figure II.35	*Appareillage pour la mesure du retrait.*	*132*
Figure II.36	*Absorption d'eau par succion capillaire.*	*133*

CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS		
Figure №	Titre de la figure :	Page №
Figure III.1	Etalement des différents BAP réalisés.	136
Figure III.2	Temps de passage T_{50} des différents BAP réalisés.	137
Figure III.3	Différence des hauteurs des différents BAP réalisés.	138
Figure III.4	Temps d'écoulement des différents BAP réalisés.	139
Figure III.5	Hauteur de remplissage des différents BAP réalisés.	140
Figure III.6	Taux de remplissage des différents BAP réalisés.	140
Figure III.7	Densité des différents BAP réalisés.	141
Figure III.8	Air occlus des différents BAP réalisés.	142
Figure III.9	La stabilité au tamis des différents BAP réalisés.	142
Figure III.10	Vitesse ultrasonique des différents BAP réalisés.	143
Figure III.11	Résistance à la compression des différents BAP réalisés.	144
Figure III.12	Résistance à la traction par flexion des différents BAP réalisés.	145
Figure III.13	Retrait des différents BAP réalisés.	146
Figure III.14	Gonflement des différents BAP réalisés.	146
Figure III.15	Absorption d'eau par capillarité des différents BAP réalisés.	147

LISTE DES TABLEAUX.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.		
Tableau №	Titre du tableau :	Page №
Tableau I.1	Types de béton en fonction de leur destination	6
Tableau I.2	Types de béton en fonction de leur masse volumique	7
Tableau I.3	Types de béton en fonction de D_{max}	7
Tableau I.4	Types de béton en fonction de leur consistance	7
Tableau I.5	Classes de résistance à la compression	8
Tableau I.6	Ajouts cimentaires	24
Tableau I.7	Résistances à la compression	26
Tableau I.8	Recommandation concernant l'espacement normalisé	91
CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS.		
Tableau №	Titre du tableau :	Page №
Tableau II.1	l'Analyse chimique du ciment et composition du clinker	102
Tableau II.2	Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés	105
Tableau II.3	fibres industrielles FI 50	108
Tableau II.4	Compositions des différents BAP étudiés ($1m^3$ de béton)	110
Tableau II.5	Essais de caractérisation sur bétons frais	112
Tableau II.6	Essais de caractérisation sur bétons durcis.	123

CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS.

Tableau №	*Titre du tableau :*	*Page №*
Tableau III.1	*Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais.*	*135*
Tableau III.2	*Résultats des vitesses ultrasoniques du différents BAP.*	*143*
Tableau III.3	*Résultats de Résistance à la compression et traction du différents BAP.*	*144*

Notations

BAP : *Béton autoplacant (autonivelant).*
BAPF : *Béton autoplacant fibré.*
BHP : *Béton à hautes performances.*
BO : *Béton ordinaire.*
BAPT : *Béton autoplaçant témoin sans fibres.*
BAPFM1 : *Béton autoplaçant de fibres métalliques industrielles RC-80/50.*
BAPFM2: *Béton autoplaçant de fibres métalliques industrielles FI 50.*
D_{max} : *Dimension maximale des granulats.*
G/S : *Rapport Gravillon/Sable.*
E/C : *Rapport Eau/Ciment.*
d/D : *Réservée à la désignation des granulats dont les dimensions s'étalant de d à D.*
d: *Dimension la plus petite.*
D : *Dimension la plus grande des grains.*
fc_{28} : *Résistance caractéristique à la compression à 28 jours.*
$f_{ck\text{-}cyl}$ *: Résistance caractéristique mesurée sur cylindres.*
$f_{ck\text{-}cube}$ *: Résistance caractéristique mesurée sur cubes.*
A_c : *Aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.*
SO_3 : *Trioxyde de soufre.*
CO_2 : *Dioxyde de carbone.*
(C3S) **$3CaO.SiO_2$** *Le silicate tricalcique.*
(C2S) **$2CaO.SiO_2$** *Le silicate bicalcique.*
(C3A) **$3CaO.Al_2O_3$** *L'aluminate tricalcique.*
(C4AF) **$4CaOAl_2O_3.Fe_2O_3$** *L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)*
Na_2O : *Oxyde de sodium.*
K_2O : *Oxyde de potassium.*
MgO : *Oxyde de magnésium communément appelé magnésie.*
CEM I: *Ciment portland (CPA).*
CEM II: *Ciment Portland composé (CPJ).*
CEM III: *Ciment de haut fourneau (CHF).*
CEM IV: *Ciment pouzzolanique (CPZ).*
CEM V: *Ciment au laitier et aux cendres (CLC).*

INTRODUCTION GENERALE.

INTRODUCTION :

Les fibres sont utilisées dans le béton pour diverses applications où elles servent principalement à contrôler la densité et la largeur de la fissuration du béton plastique, la fissuration de retrait par séchage ainsi qu'à augmenter la ténacité et à accroitre la résistance mécanique du béton. Cependant les coûts supplémentaires qu'engendrent l'achat et la mise en place des bétons fibrés, font d'eux des matériaux qui sont utilisés pour des applications où l'augmentation de performance relativement à l'entretien ou à la durabilité du produit fini permet de justifier le coût supplémentaires. L'utilisation de bétons fibrés plus facile à manipuler et à mettre en place pourrait faire bénéficier à de nouvelles applications les nombreux avantages qu'offrent les fibres.

La mise en place des bétons fibres ordinaires nécessite beaucoup de vibration pour assurer une bonne compacité du béton. Ceci entraîne des coûts de main-d'œuvre plus élevés et une nuisance sonore qui, par exemple, peut empêcher certains travaux de s'effectuer de nuit en région urbaine. De plus, dans certains cas où la densité des armatures est grande, il peut s'avérer difficile d'assurer un bon remplissage des coffrages car les armatures interfèrent avec l'écoulement de béton.

Le béton autonivelant (BAP), comme son nom l'indique, est un béton qui se met en place sans aucune vibration même dans des endroits très encombrés par les armatures et cela tout en préservant une bonne homogénéité jusqu'au durcissement. La confection d'un BAP avec fibres (BAPF) pourrait faciliter grandement la mise en place avec tous les avantages que cela comporte. Entre autres, il est raisonnable de penser que la main d'œuvre nécessaire serait moindre et qu'une mise en place plus rapide serait possible pour les bétons fibrés. En conséquence, les coûts de confection pourraient ainsi diminuer.

En plus, la grande maniabilité des BAP et BAPF assure la fabrication d'ouvrages dont la finition est toujours d'une qualité acceptable. Ainsi, les cas où la durabilité à long terme serait affectée par les des défauts dus à la mise en place seraient peut nombreux. Du point de vue de la durabilité du matériau, des ouvrages récents montrent que la durabilité des BAP peut être au moins égale à celle des bétons conventionnels.

Le champ d'application des BAPF serait au moins égal à celui des bétons conventionnels avec fibres. De plus, il est que les applications deviennent plus nombreuses pour deux raisons. La première, d'ordre technique, repose sur le fait que la grande maniabilité des BAPF peut les

rendre capables de nouvelles applications. La deuxième, d'ordre économique, est que la baisse du coût de mise en place peut rendre l'utilisation de fibres plus adorable. Par exemple, les fibres sont déjà biens connues pour leur effet bénéfique en tant qu'une armature secondaire. Cette propriété pourrait être plus exploitée pour des ouvrages peu renforcés tels que les murs des constructions résidentielles.

CHAPITRE I :

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.

I. 1- Introduction :

I. 1- 1- Matériau béton :

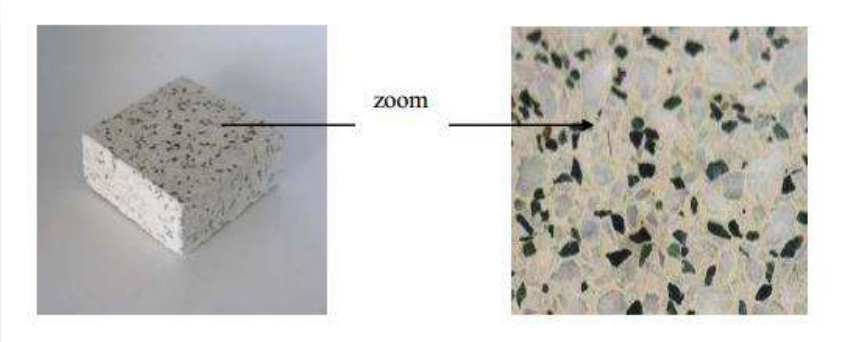
I. 1- 1-1- Définition :

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ».

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil .Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.
La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et la matrice :

- Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

- La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu. La (figure I.1) montre la texture d'un même matériau granulaire à différents grossissements. **[1]**



a) Image originale. b) Détail agrandi.

Figure I.1. Structure hétérogène du béton. [1]

I. 1- 1-2- Types de bétons :

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

I. 1- 1-2-1- Leur destination : [2]

Tableau I.1. Types de béton en fonction de leur destination : [2]

Types de béton :	Destination :
Bétons compactés au rouleau :	Bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés :	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés.
Bétons de construction :	Destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance.
Bétons autonivelants (autoplaçants) :	Pour les ouvrages présentant un ferraillage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau :	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels.
Bétons fibrés :	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou des pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).

I. 1- 1-2-2- Leur masse volumique :

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Tableau I.2. Types de béton en fonction de leur masse volumique : [3]

Types de béton :	Béton léger.	Béton normal.	Béton lourd.
Masse volumique (kg/m^3) :	De 800 à 2000.	De 2000 à 2600.	Supérieure à 2600.

I. 1- 1-2-3- Leur granularité :

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des granulats D_{max} :

Tableau I.3. Types de béton en fonction de D_{max} : [4]

Classes du béton :	Béton fin.	Béton moyen.	Béton gros.
Dimension maximale des granulats D_{max} :	$8 \leq D_{max} < 16mm$	$16 \leq D_{max} \leq 31.5$	$31.5 \leq D_{max} < 63$

I. 1- 1-2-4- Leur consistance (cône d'Abrams) :

Elle est définie en utilisant le cône d'Abrams, et on obtient les cinq classes suivantes :

Tableau I.4. Types de béton en fonction de leur consistance : [5]

Affaissement (Aff.) en cm :	Classe des bétons :
0 à 2	Très ferme
3 à 5	ferme
6 à 9	plastique
10 à 13	mou
>14	Très mou

I. 1- 1-2-5- Leur résistance à la compression sur cylindre f_{ck} :

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au (tableau I.5).

Dans ce tableau :

f_{ck-cyl} : est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Eurocode 2);

$f_{ck-cube}$: est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

Tableau I.5. Classes de résistance à la compression : [6]

Classes :	$C_{8/10}$	$C_{12/15}$	$C_{16/20}$	$C_{20/25}$	$C_{25/30}$	$C_{30/37}$	$C_{35/45}$	$C_{45/55}$
f_{ck-cyl} (N/mm^2)	8	12	16	20	25	30	35	45
$f_{ck-cube}$ (N/mm^2)	10	15	20	25	30	37	45	55

I. 1- 1-3- Propriétés du béton :

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **Le béton frais :** mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;
- **Le béton durci :** solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

I. 1- 1-3-1- Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferraillage.**[7]**

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais.

Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau. **[8]**

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façon et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques uns, les plus couramment utilisés dans la pratique. **[9], [10]**

I. 1- 1-3-1-1- Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance. **[11]**

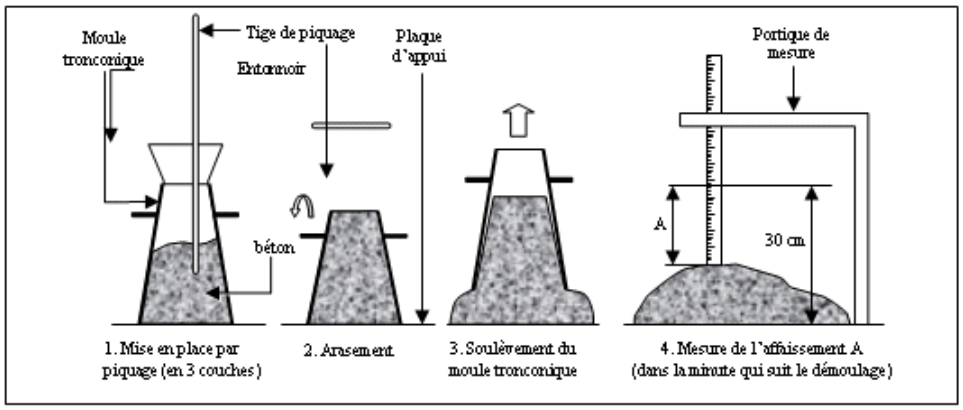


Figure I.2. Essai d'affaissement au cône d'Abrams. [11]



Figure I.3. Mesure de l'affaissement. [11]

I. 1- 1-3-1-2- La masse volumique du béton frais :

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$\boldsymbol{D = \frac{m_2 - m_1}{V}}$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m^3)

m_1: est la masse du récipient (kg).

m_2: est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m^3)

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 (kg/m^3) les plus proches.



Figure I.4. Béton frais. [12]

I. 1- 1-3-2- Propriétés du béton 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.

- 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.

I. 1- 1-3-2-1- Résistance à la compression : [13]

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uni-axiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité.

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, fc_{28}. La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur.

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée. La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Où :

- f_c: résistance en compression, exprimée en méga pascal (Newton par millimètres carrés [N/mm^2]) ;
- F : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa (N/mm^2) près.

I. 1- 1-3-2-2- Resistance à la traction par flexion : [14]

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 7 x 7 x 28 cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.**[15]** Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points.

Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : M = P×a / 2 et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_{tj} = 6M / a^3$, la relation suivante permet de calculer la résistance :

$$f_{tj} = \frac{1.8P}{a^2}$$

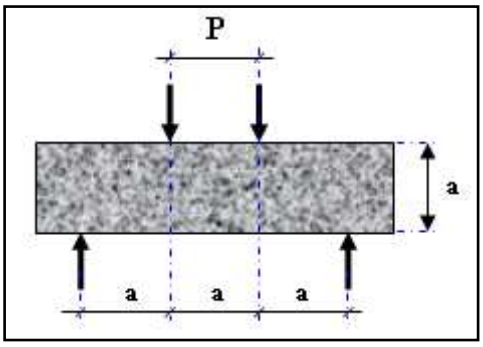


Figure I.5. Essai de traction par flexion

I. 1- 1-4- Constituants du béton:

I. 1- 1-4-1- Eau de gâchage :

Pour gâcher le béton, l'eau potable est toujours utilisable mais de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'avoir recours à une eau non potable.

Une eau de gâchage non adéquate va ralentir la prise, réduire la résistance mécanique, favoriser la corrosion des armatures.

Les impuretés, telles que les composés chimiques relativement réactifs ou les particules en suspension, indésirables du fait de leur quantité ou de leur qualité, vont influer négativement sur les propriétés du béton et des armatures.

- **Aptitude à l'emploi:**

Pour évaluer l'aptitude à l'emploi d'une eau de gâchage on doit vérifier les critères suivants

- Les critères sensoriels (l'odeur, la vue)
- Les critères chimiques (matières en suspension, huiles et matières grasses, valeur de PH, teneurs en Sulfates, sucre, Chlorures, Phosphates, Nitrates, Zinc, Sulfures, Sodium, Potassium.)

I. 1- 1-4-2- Granulats :

I. 1- 1-4-2-1- Définition :

On appelle granulat un matériau granulaire utilisé dans le domaine de construction, soit lié à d'autres substances (liant, bitume) pour obtenir mortier, bétons, bétons routiers …etc., soit non lié comme les ballasts des voies ferrées, les granulats pour le système de drainage. Il est constitué de plusieurs grains minéraux de différentes dimensions comprises entre 0 et 125 mm le plus fréquemment mais peuvent être allé jusqu'à 150 mm par exemple pour des exigences d'utilisations (Cas des barrages). Le granulat peut être de provenance naturelle ou artificielle.

I. 1- 1-4-2-2- Caractéristiques :

Les granulats sont caractérisés par des spécificités qu'ils doivent satisfaire pour réaliser une bonne utilisation dans différents domaines. Ces spécifications dites caractéristiques des granulats sont bornées par des normes et des exigences. Elles servent à prendre en compte l'utilisation, la fiabilité, l'économie en se basant sur les recherches et les expériences scientifiques. On distingue :

- **Caractéristiques intrinsèques:**

Ce sont les propriétés appartenant au granulat lui-même et qui sont inhérentes au temps. Elles sont liées à l'origine des roches ou des produits constituant le granulat. Parmi ces caractéristiques on cite les suivantes :

a. Caractéristiques physiques et mécaniques :

- **Résistance à l'usure des gravillons :**

Elle est déterminée par l'essai Micro-Deval en présence d'eau ou à sec. Cet essai consiste à reproduire dans un cylindre en rotation des phénomènes d'usure par frottement.

Cette résistance est caractérisée par le coefficient Micro-Deval qui représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai (éléments inférieurs à 1.6mm). Plus le coefficient MD est faible, plus la résistance à l'usure des gravillons, est élevée. **[15]**

On peut aussi exploiter un autre coefficient pour évaluer la résistance à l'usure des gravillons et aussi des cailloux, c'est le coefficient Deval " D ", il est déterminée à partir d'un essai Deval qui a pour objet de définir la résistance à l'usure des gravillons et des cailloux par frottement mutuel dans un cylindre à sec ou en présence d'eau.

Il est donné par la formule suivante :

$$\boldsymbol{MDE = \frac{(500 - m)}{5}}$$

Où :

m : la masse des éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits lors de l'essai.

- **Résistance à la fragmentation des gravillons :**

Elle est déterminée par le coefficient Los-Angeles. Le principe de cet essai est la détermination du coefficient dit " Los-Angeles " pour évaluer la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

Il consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient LA représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient, est faible plus la résistance des gravillons, est élevée.

A l'aide d'un autre coefficient on peut également évaluer la résistance d'un granulat à la fragmentation, c'est le coefficient de fragmentation dynamique.

Il est déterminé à partir d'un essai qui consiste à mesurer la quantité d'éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. La formule qui sert à calculer le coefficient de fragmentation dynamique est la même que celle du coefficient Los-Angeles.

- **Résistance au polissage des gravillons :**

Cette résistance est évaluée à partir d'un coefficient de polissage accéléré des gravillons, ce dernier se calcule à partir d'un essai qui fournit une mesure relative caractérisant l'aptitude des gravillons à se polir. Plus le coefficient de polissage accéléré est élevé, plus la résistance au polissage est importante. **[16]**

- **Résistance des gravillons au gel-dégel :**

La vulnérabilité du granulat dans le béton à l'action du gel-dégel est en fonction de sa nature, de son utilisation, des conditions climatiques et de la formulation du béton (utilisation par exemple d'air entraîné). Concernant le granulat lui-même la vulnérabilité est en fonction de trois critères, l'absorption d'eau, la résistance à la fragmentation après l'essai gel-dégel et sa sensibilité au gel. **[17]**

- **Masse volumique :**

On appelle masse volumique d'un corps, la masse de l'unité de volume de ce corps. On distingue :

- **Masse volumique apparente :** masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.
- **Masse volumique absolue :** masse de l'unité de volume d'un corps sans tenir compte des vides qu'elle contient.
- **Masse volumique réelle :** masse de l'unité de volume absolue de corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le corps sans tenir compte du volume des vides inter-granulaires.

- **La porosité :**

La porosité est le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage. Elle influe sur l'aptitude de résister aux sollicitations mécaniques (compression statique, usure, abrasion...etc.), chimiques (attaque en ions solvants) et surtout à la tenue au gel-dégel ; c'est pour ça que la porosité est un critère important et sert à améliorer les performances des bétons notamment leur durabilité.

- **Teneur en eau :**

Elle est égale au rapport de la masse d'eau contenue dans l'échantillon sur la masse sèche de l'échantillon, exprimée en pourcentage. La teneur en eau est un facteur important pour adapter les proportions des constituants lors de la formulation des bétons afin d'éviter le phénomène de foisonnement ou la perturbation de la consistance des bétons.

- **Coefficient d'absorption d'eau :**

Il est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entrainée par imbibition partielle en eau à la masse de matériau sec.

b. Caractéristiques chimiques et diverses :

- **Réaction alcali-silice (alcali-réaction) :**

Sous ce terme se regroupent toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment. **[18]** Les granulats doivent être inertes vis à vis de l'alcali-réaction lorsqu'il y a un risque identifié pour l'ouvrage ou un élément d'ouvrage en béton. Il doit être possible de connaître la teneur en alcalins actifs afin de pouvoir établir un bilan pour une formulation de béton et déterminer la présence de granulats partiellement réactifs ou non qualifiés. Les désordres occasionnés par l'alcali-réaction se présentent sous forme de faïençage ou d'éclatement du béton. **[19]**

- **Teneur en chlorure :**

Les ions de chlorure modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Les normes fixent les limites de la teneur en chlorure des bétons en différenciant les bétons non armés, armés, ou précontraints. Dans le cas où la valeur de la teneur en chlorure dépasse la limite recommandée, le producteur doit communiquer cette valeur pour permettre l'établissement du bilan des chlorures dans la formulation des bétons. **[20]**

- **Friabilité des sables :**

La friabilité des sables est une mesure globale d'homogénéité appliquée aux sables alluvionnaires et aux produits de démolition. Une valeur élevée indique une forte proportion d'élément tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons surtout des dallages et des chaussées. Le coefficient de friabilité des sables est le rapport de la masse m, des éléments inférieurs à 0.1 mm, produits au cours de l'essai de fragmentation du sable dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge et en présence d'eau, sur la masse de matériau soumis à l'essai. Le rapport est exprimé en pourcentage. **[21]**

- **Teneur en matière organique :**

La présence de la matière organique peut perturber la prise des bétons, faire chuter les résistances surtout au jeune âge et donner lieu à des taches sur les parements. Pour les sables un test calorimétrique est réalisé et pour les sables non conformes, on fait des essais complémentaires : comparatifs de résistance sur mortiers.

- **Teneur en sulfates (SO_3) :**

Les sulfates solubles (gypse, plâtre) en faible proportion peuvent perturber la prise et modifier les effets des adjuvants (réducteur d'eau). Cette action dépend en fait de la qualité de SO_3 présente dans le béton.

- **Teneur en soufre :**

Les sulfures (pyrites) présents dans certains granulats (calcaires primaires notamment) peuvent s'oxyder et se transformer en sulfates pouvant donner lieu à des réactions expansives (formation d'ettringite) avec le ciment. Cette oxydation s'accompagne souvent de la production de taches de rouille sur les parements, et lorsque les grains de pyrites sont assez gros (millimétriques), on obtient des pustules et des éclatements.

- **Résistance au choc thermique :**

Les granulats doivent être résistants à la chaleur.

- **Caractéristiques de fabrication :**

Ces caractéristiques résultent des conditions de fabrication, du processus d'élaboration (extraction, fragmentation, séparation granitaire, lavage, criblage …etc.), de la performance et l'aptitude de travailler correctement au niveau du lieu de fabrication (capacités humaines et matérielles). Ce sont:

a. **Granularité :**

C'est la distribution dimensionnelle des grains contenus dans le granulat, elle sert à classer le granulat.

b. Classe granulaire :

La classe granulaire désigne un granulat selon son plus petit diamètre de grain représentatif et son plus grand diamètre de grain représentatif. Cela permet ainsi de différencier les granulats entre eux et de les classer. Cela indique aussi la plage des diamètres de grains couverte par un granulat. Elle est définie par le terme d/D, réservée à la désignation des granulats dont les dimensions s'étalant de d à D.

Où :

d: est la dimension la plus petite.

D : la dimension la plus grande des grains.

L'appellation d/D doit satisfaire aux conditions sur les refus de tamis de maille de diamètre D et les tamisas de tamis de maille de diamètre d.

c. Courbe granulométrique :

C'est la distribution pondérale des granulats. On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisas sous les tamis dont les mailles sont indiqués en abscisse selon une graduation semi logarithmique. La série des diamètres de mailles des tamis utilisés est une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10} \approx 1{,}25$.

L'intérêt de la courbe granulométrique est de donner des informations concernant :

- La courbure (granulométrie bien graduée ou mal graduée) à l'aide du coefficient de courbure Cc.
- L'uniformité (granulométrie serrée ou étalée) à l'aide du coefficient d'uniformité Cu.
- La continuité ou la discontinuité. **[22]**

d. Forme des granulats :

- Coefficient volumétrique ;
- Coefficient d'aplatissement ;
- L'indice de forme.

e. Propreté des granulats :

- Équivalent de sable ;
- Essai au bleu de Méthylène ;
- Propreté superficielle des gravillons ;
- Module de finesse.

I. 1- 1-4-2-3- Classification des granulats : [23]

On peut classer les granulats en fonction de leur granularité déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à maille carrées dans une série normalisée. On distingue plusieurs familles de granulats :

- Fillers 0/D où D≤ 2 mm et contenant au moins 70% de passant à 0.063mm.
- Sablons 0/D où D≤ 1 mm et contenant moins de 10% de passant à 0.063mm.
- Sable 0/D où D≤ 6.3 mm sauf les sables pour béton où D≤ 4mm.
- Graves 0/D où D>6.3 mm.
- Gravillons d/D où d≥ 1 mm et D≤31.5 mm.
- Cailloux d/D où d≥ 20 mm et D≤125 mm.

Remarque :

La famille dite ballast d/D où d ≥ 25 mm et D≤50 mm est complètement contenu e dans la famille dite cailloux d/D où d≥ 20 mm et D≤125 mm, c'est pour cela qu'elle n'est pas citée dans la classification précédente.

I. 1- 1-4-2-4- Types des granulats:

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même.

❖ **En fonction de leur masse volumique réelle :**

a. Granulats légers :

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est inférieure à 2 t/m^3, comme les argiles, les schistes, les laitiers expansés ou encore les pouzzolanes. Ils sont destinés à la préparation des bétons légers.

b. Granulats courants :

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est entre 2 et 3 t/m^3, comme les matériaux naturels, alluvionnaires (silex, calcaire dur silico-calcaire) de densité entre 2.5 et 2.7, éruptifs ou sédimentaires (grés, porphyres, diorite, basaltes, …etc.) de densité entre 2.6 et 3.

c. Granulats lourds :

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à 3 t/m^3. Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour construire des ouvrages nécessitant une protection biologique contre le rayonnement. On utilise en particulier les barytines, les magnétites qui ont une densité entre 3.4 et 5.1, aussi les riblons et les grenailles de fonte qui ont une densité entre 7.6 et 7.8.

- **En fonction de leur origine :**

a. Granulats naturels :

Ce sont des matériaux purement naturels, ne subissant aucun traitement autre que mécanique tel qu'extraction, concassage, broyage, criblage, lavage…etc.

b. Granulats artificiels :

Ce sont les granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais ou de sous produits industriels (laitiers, scories), ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton souvent appelés granulats recyclés.

- **En fonction de la forme de leurs grains :**

a. Granulats concassés :

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches de porphyres, grés, calcaires, quartzites, de galets concassés et de laitiers.

b. Granulats roulés :

Ils représentent les granulats ayant subis une altération naturelle mécanique due à l'eau, au vent, à l'usure réciproque des granulats lors de leur transportation dans la nature. Il résulte que plus de 90% des surfaces des grains sont arrondies et de provenance alluvionnaire.

I. 1- 1-4-3- Ciment :

I. 1- 1-4-3-1- Introduction :

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du 1T clinker1T qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté de 1450 a 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, transforme la pâte liante, qui a une 1T consistance1T de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau.

I. 1- 1-4-3-2- Constituants principaux et additions :

❖ **Constituants du clinker :**

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3CaO.SiO_2$ (C3S) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique $2CaO.SiO_2$ (C2S) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique $3CaO.Al_2O_3$ (C3A) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique) $4CaOAl_2O_3.Fe_2O_3$ (C4AF) (5-15% du clinker).

Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis (Na_2O, K_2O), de la magnésie (MgO), et diverses traces de métaux. La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnent les noms suivants:

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de 50µ.
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).
- C = célite (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse.

❖ **Autres constituants des ciments :**

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute d'autres constituants associés au clinker pour leurs caractéristiques chimiques ou physiques spécifiques. Les constituants les plus utilisés sont:

Tableau I.6. Ajouts cimentaires :

Constituants :	**Observations :**
Calcaires	• considérés comme les constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO3 supérieure à 75% en masse.
Laitier granulé de haut fourneau	• sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques, obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.
Cendres volantes (V ou W)	• produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue : Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques et les cendres volantes calciques (W).
Schistes calcinés	• schistes portés à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.
Fumée de silice:	• sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. • formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Elles ont des propriétés pouzzolaniques.
Fillers:	• "constituants secondaires" des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. • matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

I. 1- 1-4-3-3- Catégories de ciment :

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

❖ **En fonction de leur composition:**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- CEM I: Ciment portland (CPA)
- CEM II: Ciment Portland composé (CPJ),
- CEM III: Ciment de haut fourneau (CHF),
- CEM IV: Ciment pouzzolanique (CPZ),
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

❖ **En fonction de leur résistance normale:**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes "R" sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Tableau I.7. Résistances à la compression :

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression (bars)		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours	
			Minimales	maximales
350	----------	----------	250	450
450	----------	----------	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	----------	----------	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR Très hautes performances	----------	300	550	----------

I. 1- 1-5- Formulation du béton :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants ou on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (Faury, Bolomey, Vallette).
- Les méthodes graphiques (Joisel, Dreux-gorisse).

I. 2- Bétons autoplaçants (BAP):

I. 2- 1- Historique:

Afin de suivre les progrès réalisés dans les procédures de construction et les conceptions des ouvrages, et afin de satisfaire aux critères politico-économiques et environnementaux, les ingénieurs et les technologiques qui traitent directement ou indirectement du béton doivent sans cesse améliorer leur connaissance sur les propriétés de béton autoplaçant de construction qui est le plus utilisé dans le monde (1000 kg/habitant/année).

On assiste aujourd'hui à un développement de la recherche dans les universités en étroite collaboration avec l'industrie dans le but de perfectionner et d'industrialiser toujours plus les procédés de fabrication, pour des raisons de rentabilité a court terme probablement la pratique impose des problèmes à la recherche scientifique.

C'est dans cet ordre d'idées que plusieurs compagnies, centres de recherche et universités dans le monde ont dirigé leur études vers le développement d'une nouvelle gamme de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures du point de vue théorique et architectural (structure qui se caractérisent par la complexité de leurs modèles, forme variable et courbures multiples et à ferraillages très congestionné), face à une main d'oeuvre de moins en moins qualifiée engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration de béton surtout au Japon. **[24]**

I. 2- 2- Définition:

Ces nouveaux bétons sont des bétons fluides autoplaçants qui se mettent en place dans les coffrages sans efforts de vibration tout en garantissant des structures résistantes et durables, ce sont des bétons qui contiennent plusieurs combinaisons de matériaux cimentaires et ajouts chimiques.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 1980 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima, Obayashi,…) **[24]**

- **Les avantages des bétons autoplaçants :**
  - L'absence de vibration et donc de nuisances sonores ;
  - Des aspects de surface d'une bonne régularité ;
  - Une diminution de risque de fissuration ;
  - Un gain de temps sur les bétonnages ;
  - Une pénibilité fortement réduite pour les maçons ;
  - Une surpression des risques d'accident liés a la manutention de la benne ;
  - Une économie de mains d'œuvres et un meilleur enrobage des armatures ;
  - Une bonne planimétrie du support fini. **[24]**

I. 2- 3- Concept du béton autoplacant :

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. **[25]**

Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais **[26] [27].** Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure I.6). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.

C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

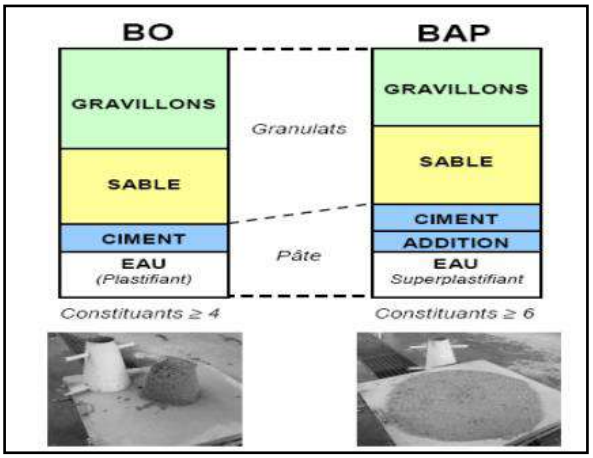


Figure I.6. (a) Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP
(b) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.

- Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.
- Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre la stabilité et la maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

I. 2- 4- Constituants d'un BAP :

¤ Introduction :

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique et morphologique. Ainsi, nous allons décrire dans ce chapitre les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions miné rales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. En effet, si l'un de ces constituants n'est pas présent, le béton n'existerait pas. Les bétons autoplaçant s par contre, sont possibles grâce aux ajouts d'adjuvants et d'additions minérales à la composition de base du béton.

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants. **[28]**

- **Ciment et eau :**

Les deux constituants principaux de la pâte de ciment, qui constitue la matrice d'un béton sont peu étudiés en tant que facteurs indépendants. Leurs influences sur l'écoulement sont implicitement mises en évidence en se basant sur le rapport E/C. Ce paramètre est très relié aux différentes propriétés des bétons, aux états frais et durci. **[28]**

I. 2- 4-1- Eau :

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. **[28]**

I. 2- 4-2- Ciment :

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type du ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton **[29]** (résistance à la compression, temps de début de prise, stabilité, retrait, teneurs en chlorures et en sulfates, pouzzolanicité, etc.).

Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influant sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse. **[30]**

Par ailleurs, le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C et malgré l'importance du ciment, l'influence de son dosage sur les propriétés d'écoulement est peu étudiée dans la littérature concernant les BAP.

I. 2- 4-3- Granulats :

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm **[29]** et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La nature des roches constituant les gisements est responsable des propriétés intrinsèques (masse volumique, résistance, porosité, réactivité, etc.) des granulats **[29].** La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. **[30]**

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 réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

I. 2- 4-4- Additions minérales :

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

- **Avantages économiques et environnementaux :**

La plupart des additions minérales 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 additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature.

- **Avantages techniques :**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles 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 **[31].** 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 additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

- **Filler calcaire :**

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement écrasés.

Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines. La taille dans une gamme inférieure à 0,125mm sera un très grand avantage.

De nature inerte, le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange cimentaire.

Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP). Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C **[32] [33].** Yahia et al **[33]** montrent qu'à chaque rapport E/C correspond un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. La (figure I.7) montre l'évolution de l'écoulement (représenté par l'étalement relatif et la vitesse relative d'écoulement) des mortiers à différents dosages en filler calcaire.

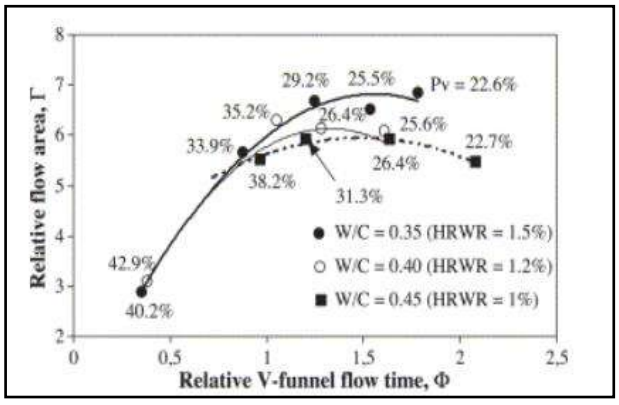


Figure I.7. Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier. [33]

Les auteurs expliquent que les particules fines du filler calcaire remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice **[33].**

Par conséquent une quantité de l'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Au delà du dosage critique, la viscosité du mortier augmente avec l'ajout du filler calcaire. En effet, les auteurs considèrent que le mortier atteint sa compacité maximale lorsque le dosage critique en filler est atteint **[33];** au-delà de ce dosage les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

I. 2- 4-5- Superplastifiants :

I. 2- 4-5-1- Définition :

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent de modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. **[34]**

En tant qu'adjuvant, le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire. La fonction de base est la fluidification, puisqu'il provoque un important gain d'ouvrabilité d'un mélange. Le superplastifiant est responsable d'un effet de plastification : à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton. La fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité. Ceci permet donc d'augmenter les performances mécaniques du mélange. **[28]**

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur (Figure I.8) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau. **[34]**

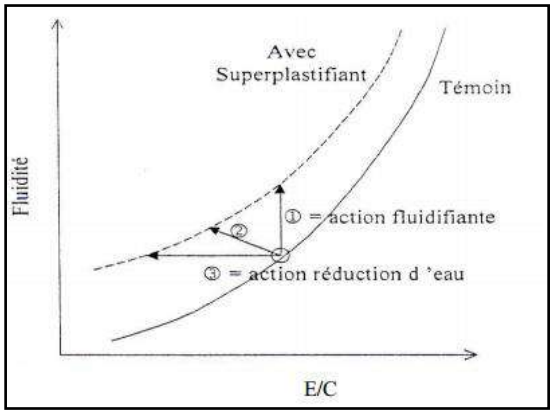


Figure I.8. Les utilisations des superplastifiants.

1- augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
2- diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
3- diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

I. 2- 4-5-2- Différentes classes :

Les superplastifiants sont des polyélectrolytes organiques, appartenant à la catégorie des dispersants polymériques. **[35]**

Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes :

- Les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS) (Figure I.9-1) ;
- Les polycondensats de formaldéhyde et de naphtalène sulfoné (PNS) (Figure I.9-2) ;
- Les lignosulfonates modifiés (MLS) (Figure I.9-3) ;
- Et les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates (Figure I.9-4) ;

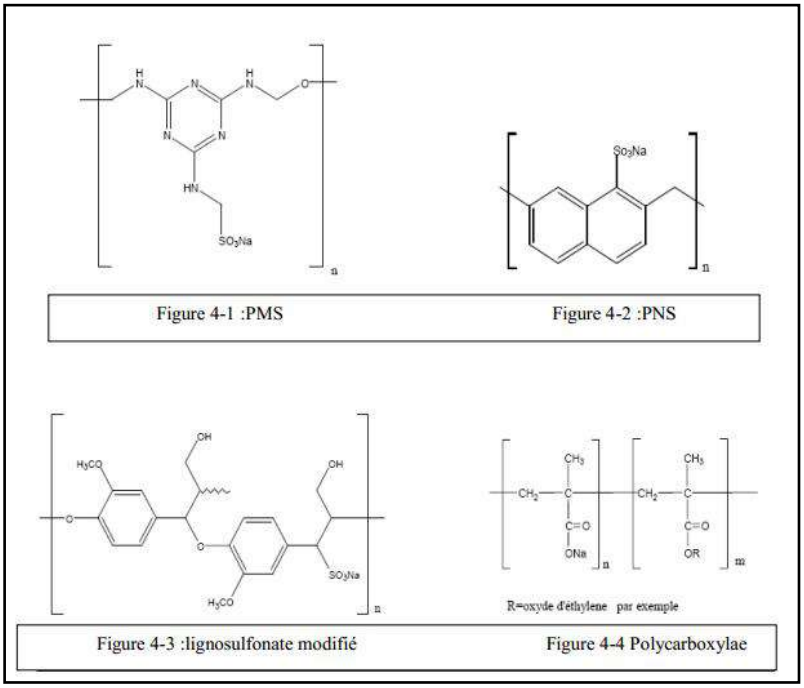


Figure I.9. Déférentes classes des superplastifiants.

¤ **Polycarboxylates :**

En 1980, l'apparition des Polycarboxylates nommés PC est une grande évolution des super réducteurs d'eau. Ils sont formés d'une combinaison de polymères dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée électrostatique et stérique. **[36]**

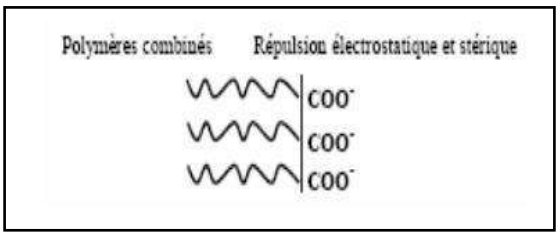


Figure I.10. Schéma général des co-polymères.

Le groupement fonctionnel est formé d'acides méthacryliques ou acryliques avec un groupe actif anionique COO- (plus efficaces par rapport aux sulfonates), et qui a été partiellement estérifié avec plusieurs chaînes latérales de Polyoxyde d'Ethylène (notées PEO)

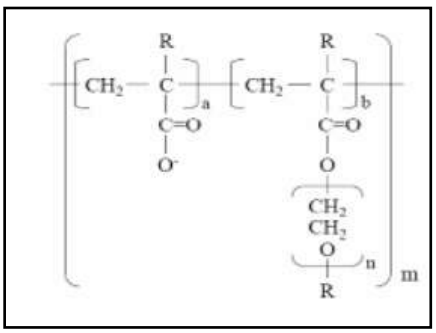


Figure I.11. Représentation schématique de la formule de polycarboxylate (PC) [Hasni 99].

R représente H ou un groupe alkyle.

La répulsion stérique est due aux chaînes de PEO qui permettent une plus forte dispersion des particules de ciment.

Flatt **[37]** montre le décalage des forces interparticulaires lorsque les particules se repoussent par l'action du co-polymère.

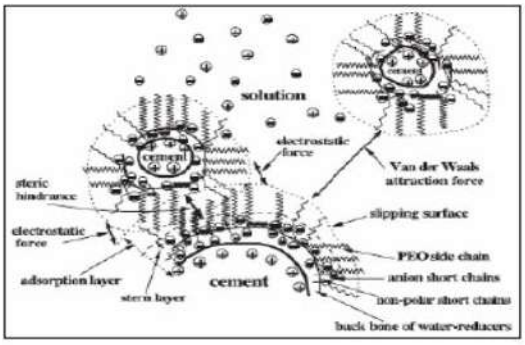


Figure I.12. Schéma des forces exercées entre un ensemble de particules de ciment sur lesquels sont adsorbés des copolymères de polycarboxylates avec des chaînes PEO

I. 2- 4-5-3- Modes d'action des superplastifiants :

Le pouvoir fluidifiant des superplastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à t = 0) **[38,39].** Ces processus sont l'adsorption des superplastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique.

La dispersion des particules de ciment par les superplastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment.

❖ Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment :

L'étude de l'effet dispersant des superplastifiants, menée par Flatt et al. **[40]** sur des suspensions modèles, a montré que seuls les superplastifiants adsorbés contribuaient à la dispersion. Les molécules de superplastifiant doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains de ciment et, seulement après, elles peuvent exercer leur pouvoir fluidifiant. Une pâte de ciment peut être envisagée comme une dispersion de particules colloïdales dans l'eau. La surface des grains de ciment porte des charges électriques, lesquelles ont pour origine des imperfections de la structure cristalline, des liaisons dissociées ou des ions adsorbés. **[41-42]**

Cette charge confère à la particule un potentiel de surface, appelé potentiel de Nernst et noté Ψ_0. Les électrolytes, présents dans la phase aqueuse, vont alors former une couche autour de la particule afin de neutraliser ce potentiel électrostatique **[43-44]** et stabiliser ainsi la dispersion. Cette couche est appelée la double couche électrochimique.

La structure de la double couche électrochimique est décrite ci-dessous d'après le modèle de Stern pour une particule portant une charge de surface positive. Elle est représentée de façon schématique à (la figure I.13).

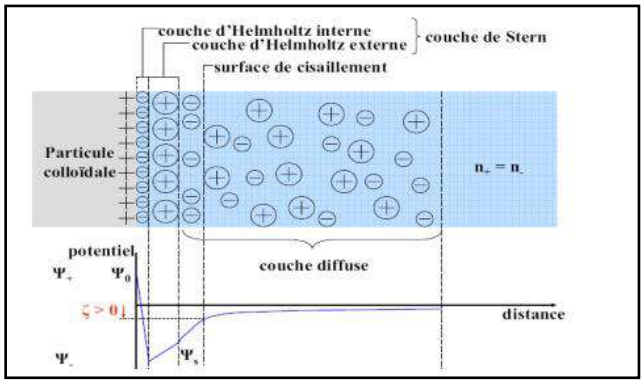


Figure I.13. Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique.

La particule est entourée par une couche fixe de molécules d'eau et d'ions adsorbés sous l'effet de l'attraction électrostatique. Cette couche est appelée couche de Stern, elle se divise en deux couches distinctes : les couches d'Helmholtz interne et externe. La couche d'Helmholtz interne est formée d'anions non solvatés. La couche d'Helmholtz externe est constituée par une monocouche de cations solvatés. En raison de leur taille relativement importante, les ions ne peuvent pas neutraliser complètement la charge de la particule colloïdale. La compensation est réalisée au sein de la couche diffuse. **[45-46]**

Dans cette couche, les ions sont mobiles et leurs concentrations évoluent avec la distance, de telle façon qu'à la fin de la couche diffuse, l'électroneutralité est atteinte.

Expérimentalement, la mesure directe du potentiel de surface des particules colloïdales est impossible. Par contre, il est possible de mesurer la différence existant e entre le potentiel à la surface de cisaillement dans la couche diffuse et le potentiel de la solution. Cette différence de potentiel est appelée le potentiel ζ. **[47]**

L'adsorption des superplastifiants est influencée par les caractéristiques physicochimiques du ciment. Il a été rapporté que l'adsorption des polymères est meilleure lorsque l a finesse du ciment est élevée **[48].** Par ailleurs, les différentes phases cimentaires n'adsorbent pas les mêmes quantités de superplastifiant. Cela a pour origine les différents potentiels ζ de ces composés. D'après Yoshioka et al. **[49],** les phases silicates, C_3S et C_2S, ont un potentiel ζ négatif de l'ordre de -5 à -10 mV. Par contre, les phases aluminates, C_3A et C_4AF, ont un potentiel ζ situé entre 5 et 10 mV. Les superplastifiants négativement chargés ont donc une plus grande affinité pour les phases aluminates.

En ce qui concerne le superplastifiant, les différents paramètres de sa structure chimique, groupement anionique, densité de charge et longueur des chaînes carbonées, ont des répercussions sur le processus d'adsorption ; elles sont décrites ci-dessous.

- **Groupement anionique :**

L'ancrage des polymères sur les grains de ciment a lieu par l'intermédiaire des groupements anioniques. Hirsch **[50]** rapporte, à ce sujet, que les groupements carboxylate s'adsorbent plus fortement que les groupements sulfonate.

- **La densité de charges :**

Plus le nombre de groupement chargé par molécule est important, meilleure est l'adsorption. **[51]**

- **Longueur des chaînes carbonées :**

D'après Blask **[52],** les polycarboxylates ayant une longue chaîne principale et de courtes chaînes secondaires présentent l'adsorption la plus importante. D'une part, le nombre de groupes —COO- augmente avec l'allongement de la chaîne principale et, d'autre part, l'encombrement stérique généré par les longues chaînes secondaires peut gêner l'adsorption.

- **Répulsion électrostatique :**

La dispersion engendrée par les superplastifiants de type polysulfonate est majoritairement due à la répulsion électrostatique **[39-53-54].** Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes **[50].** En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment, comme le montre la (figure I.14).

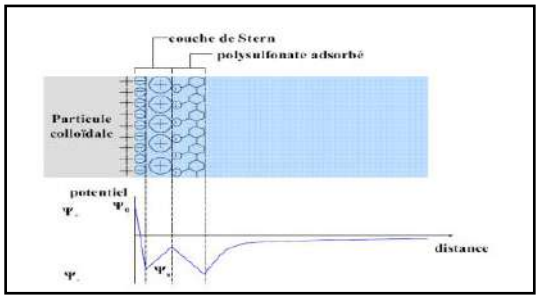


Figure I.14. Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polysulfonate.

Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation **[55].** La dispersion des grains de ciment est représentée chématiquement (figure I.15).

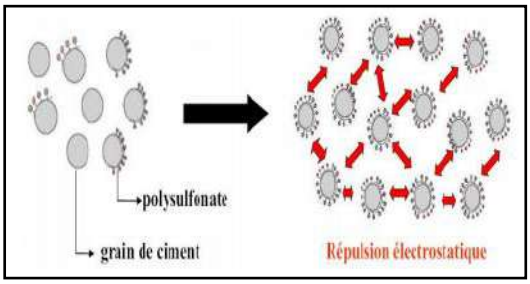


Figure I.15. Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.

Le potentiel ζ représente une valeur approchée de la force électrostatique et permet ainsi d'étudier la stabilité d'une suspension de ciment. Il a ainsi été avancé que l'intensité de la force répulsive est intimement liée à la structure moléculaire de l'adjuvant. Uchikawa et al. **[51]** Ont montré de cette façon que plus le nombre de groupements anioniques est élevé, plus le potentiel ζ est important et donc plus la répulsion est forte.

- **Encombrement stérique :**

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylates **[51].** Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution.

Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre **[50].** L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères. **[56]**

L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches **[52]**. La (figure I.16) donne une représentation schématique de cette interaction dans une suspension de ciment.

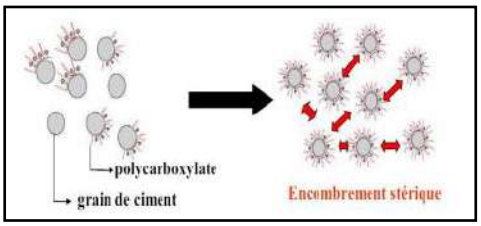


Figure I.16. Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.

Yamada et al **[57]** ont fourni les premières indications expérimentales de l'effet stérique des polycarboxylates. Ils ont mené une étude comparative des potentiels ζ de pâtes de ciment contenant différents types de superplastifiant. Il est ainsi apparu qu'en présence de polysulfonates, le potentiel ζ est négatif, alors qu'avec des polycarboxylates, le potentiel ζ est nul voire positif. Ces différences ont été expliquées par Plank et al **[58]** à partir de la structure de la double couche électrochimique lors de l'adsorption de polycarboxylates. Une représentation est proposée à la (figure I.17).

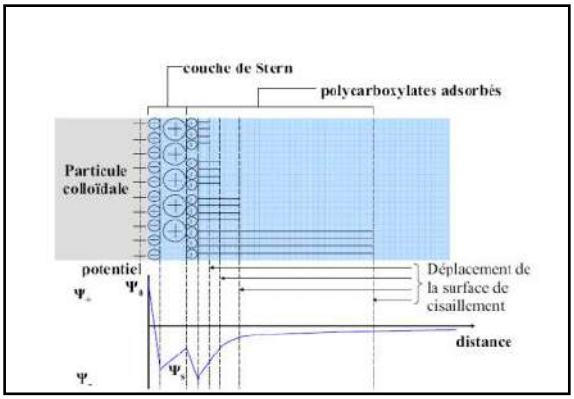


Figure I.17. Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polycarboxylate (d'après Plank et al [58]).

L'adsorption des superplastifiants de type polycarboxylate provoque un élargissement de la couche de diffusion et/ou un déplacement de la surface de cisaillement. Pour de courtes chaînes secondaires, la répulsion engendrée est, dans ces conditions, semblable à celle créée par les polysulfonates. Lorsque les chaînes secondaires s'allongent, le potentiel ζ devient nul puis positif **[58-59]**. Le potentiel ζ fournit ainsi une évaluation approximative des proportions électrostatique et stérique dans la dispersion des polycarboxylates **[58].** Elles dépendent, par conséquent, de la longueur des chaînes secondaires et de la densité de charges anioniques dela chaîne principale **[58-59]**

- **Effets rhéologiques :**

En l'absence de superplastifiant, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement **[60]** au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiant, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement. De plus, lors de la dispersion des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement. La (figure I.18) reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment.

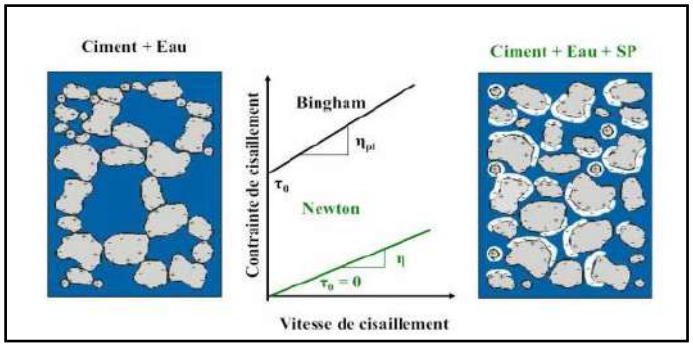


Figure I.18: Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment. [60]

I. 2- 4-5-4- Compatibilité ciment adjuvants dispersants :

La perte d'affaissement, le retard de prise, le raidissement ou la perturbation de la teneur en air entraîné sont tous synonymes d'incompatibilité ciment/adjuvant.

Tous les cas d'incompatibilité ciment/adjuvants dispersants présentés dans la documentation montrent clairement l'importance des interactions du sulfate de calcium avec l'adjuvant dispersant. Les travaux de Locher et coll. Expliquent l'importance du rapport C/A/ions sulfate sur le comportement rhéologique du béton non adjuvanté. Par contre, la présence d'adjuvant peut modifier l'équilibre entre les interactions aluminate/sulfate et ainsi affecter la maniabilité et le temps de prise du béton. **[61]**

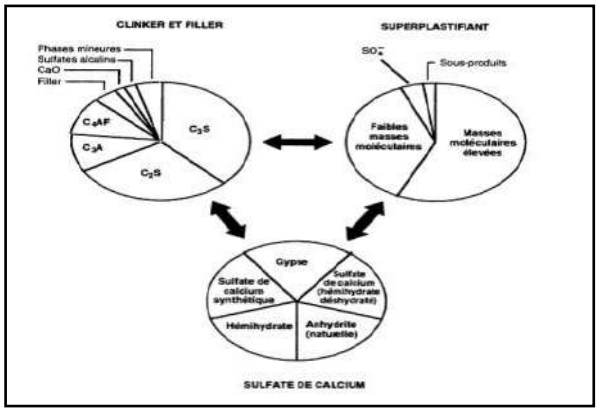


Figure I.19. Compatibilité ciment/superplastifiant/sulfate de calcium.

I. 2- 4-5-5- Influence sur l'hydratation des ciments :

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de différents superplastifiants sur l'hydratation des phases pures de ciment. Ils ont montré que les PNS et PMS retardent l'hydratation de la phase de C3A. D'autres auteurs ont également montré que ces polymères retardent l'hydratation des phases silicates, bien que leurs effets soient plus modérés que ceux induits sur les phases aluminates. **[62]**

I. 2- 4-6- 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. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. **[34]**

I. 2- 5- Modes de Formulations des BAP :

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. **[63]**

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels : **[64]**

- Absence de vibration qui réduit les nuisances sonores ;
- Bétonnage de zones fortement ferraillées et à géométrie complexe ;
- Pénibilité du travail moindre ;
- Réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants) ;
- modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première **[65-66]** concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m^3) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette a proche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales **[67].** Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

I. 2- 5-1- Cahier des charges minimum a l'état frais :

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.

- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisaillent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure I.20). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée. **[63]**

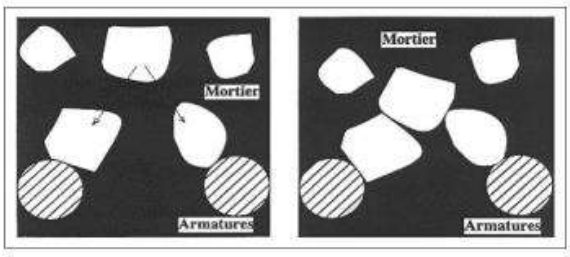


Figure I.20. Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle. [68]

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.

- de plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort pour assurer une bonne d'adhérence des armatures, et limiter les la fissuration. **[69]**

En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

I. 2- 5-2- Particularités De La Composition Des BAPs :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre. **[63]**

- **Un volume de pâte élevé**

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m^3)

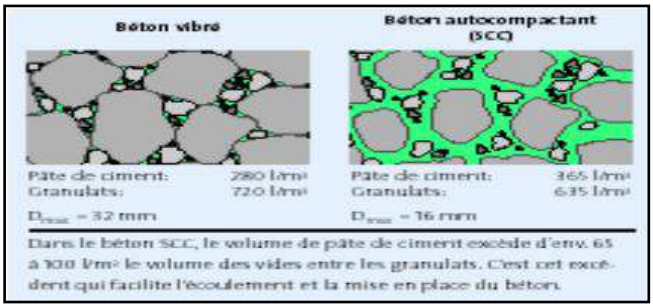


Figure I.21.Volume de pâte relatif au BAP est différent de BV

- **Une quantité de fines (Ø < 80 µm) importante :**

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé). Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18 -305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçants du béton (figure I.22)

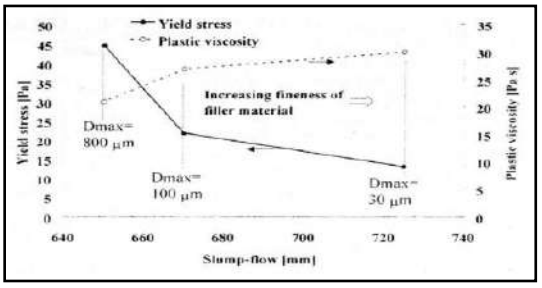


Figure I.22. Influence de la finesse d'un filler sur le comportem ent rhéologique d'un béton [29].

- **L'emploi de superplastifiants :**

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylates , polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

- **L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau) :**

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle -ci (figure I.23). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

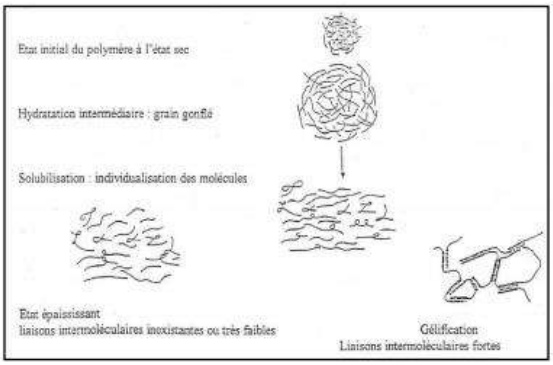


Figure I.23. Interaction entre l'eau et les polysaccharides [70].

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figur24).

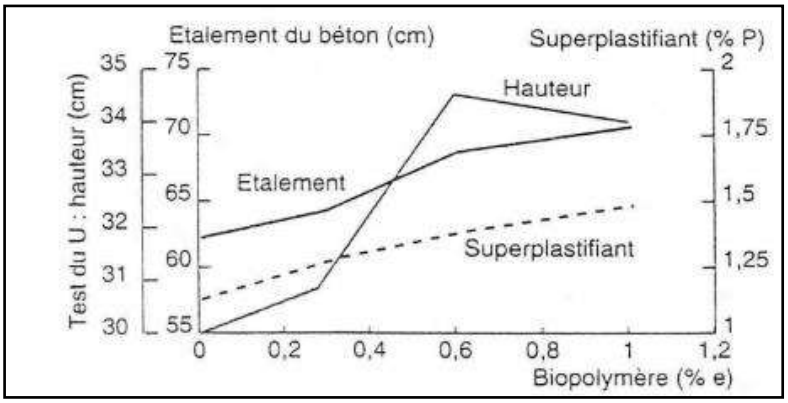


Figure I.24. Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité. **[68]**

- **Un faible volume de gravillon :**

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{max}, cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires. **[68]**

I. 2- 5-3- Quelques points à surveiller…

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport eau sur liant. Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel -dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du superplastifiant, par exemple). En effet, l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

I. 2- 6- Pratique actuelle de la formulation des BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton prés emploi, est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant pl us que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer).En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominent de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail au formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1 ;
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m3 ;
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m3. En complément, la masse d'addition se situe entre120 et 200 kg/m3 ;
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation. Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du superplastifiant dans le concept du BAP.

I. 2- 7- Approches de formulation des BAP :

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la ittérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes : **[71]**

I. 2- 7-1- Approche Basée sur l'optimisation des Mortiers

Le concepteur des BAP propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité de manière sécuritaire ; à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent a cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier : **[25]**

I. 2- 7-2- Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominent.

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage : **[72]**

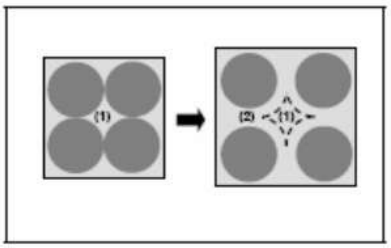


Figure I.25. Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats.

[Oh et al 99] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

I. 2- 7-3- Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons **[29].** Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte.

L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. Considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide.

A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

[Sedran et de Larrard 99] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie).Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. **[72]**

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses aut eurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. [Roshavelov 99] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

I. 2- 7-4- Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines E/(C+A), la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq point s, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFG. **[72]**

I. 2- 7-5- Principe et application des approches :

a. Approche japonaise :

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats.

Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

- **Dosage des gravillons :**

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m3 de béton est limité à la moitié de sa compacité.

Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (Figure I.26). Elle dépend bien sûr du mode de compactage. A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCP. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57 Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m^3.

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

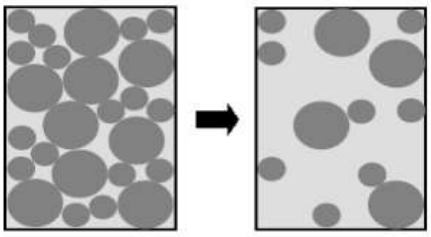


Figure I.26. Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

- **Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

- **Dosage du liant :**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m3). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

- **Dosage de l'eau et du superplastifiant :**

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. **[72]**

Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation ci – dessus :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2} \quad \text{-----(01)}$$

Où :

d est le diamètre de la galette et d_0 la base du cône. Ils définissent également l'écoulement relatif T par l'équation suivant :

$$T = \frac{10}{t_e} \quad \text{-----(02)}$$

Où : $\mathbf{t_e}$ est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les auteurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. A l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimal le mortier.

Lors des essais sur mortiers, nous avons préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m3, ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams.

(La Figure I.27) présente le résultat de la recherche du couple « eau / superplastifiant ». L'étalement normalisé D optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1.

Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minime.

Le dosage en superplastifiant trouvé est de 1 % de la masse de fines, le rapport E/(C+A) de 0,23 et la masse de ciment de 400 kg/m ^{3}.

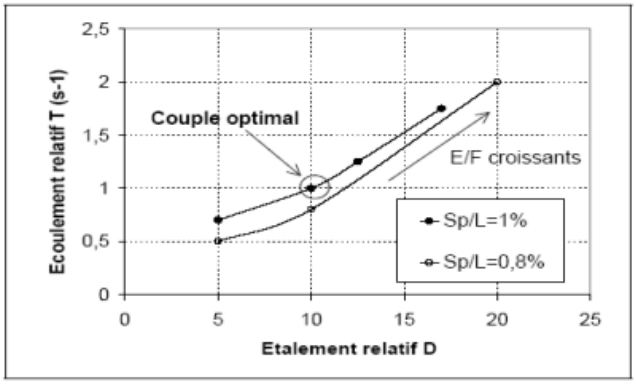


Figure I.27. Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D. La flècheindique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants .Le couple optimal est indiqué par un cercle.

b. Approche Suédoise: proposée par [Petersson et al, 1996]:

La méthode suédoise repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène.

La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. **[29]**

c. Approche Française :

Méthode française (LCPC) : proposée :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci -après :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions du mélange ;
- La compacité propre ;
- La densité apparente.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante : **[29]**

- La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.104 La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle.

La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

d. Méthode LGC :

La formulation de BAP est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura et Ouchi ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon.

La méthode développée par O. Petersson et al.vise à trouver la teneur maximale de granulat sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et al. Ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par N. Su et al, un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulat et de pâte. Sedran et de Larrard ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire.

Récemment, basé sur le travail d'A.W. Saak et al, L. Ferrara et al. ont établi une zone autoplaçante pour la formulation du BAP fibré. Une nouvelle méthode de formulation de BAP a été proposée dans ce mémoire tout en nous servant des méthodes existantes. Elle a l'avantage d'être simple à utiliser.

En effet, seulement deux types d'essais, à savoir essai de compactage pour le granulat et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires. La première particularité de la méthode est la prise en compte directe de l'influence de superplastifiant sur le comportement de la pâte à l'état frais. Ceci a été réalisé à l'aide d'un plan d'expérience permettant de relier la pâte de ciment (ou la pâte de filler), le superplastifiant et l'étalement de la pâte grâce à un petit nombre d'essais. La deuxième particularité est le développement d'un nouveau processus de calcul de mélange de la pâte et des granulats basé sur la théorie d'excès de pâte. La dernière particularité de cette méthode est qu'elle permet de confectionner aussi bien des bétons ordinaires que ceux à hautes performances pour une valeur de résistance préalablement fixée. **[73]**

I. 2- 8- Propriétés principales d'un béton à l'état frais :

Les bétons autoplaçants se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation.

Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un béton autoplaçant, plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP **[72].** Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage. **[26]**

I. 2- 8-1- Remplissage:

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externe ou interne). Le remplissage est observé sous deux aspects **[69]:**

La capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vites se d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects,

puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton. **[38]**

I. 2- 8-2- Résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité. **[38]**

I. 2- 8-3- Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP :

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement ou la viscosité plastique.

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps **[63].** Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

Le comportement rhéologique d'un matériau est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, Le fluide est considéré comme binghamien si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma$$

avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique (Pa.s^{-1}) et γ la vitesse de déformation (s^{-1}).

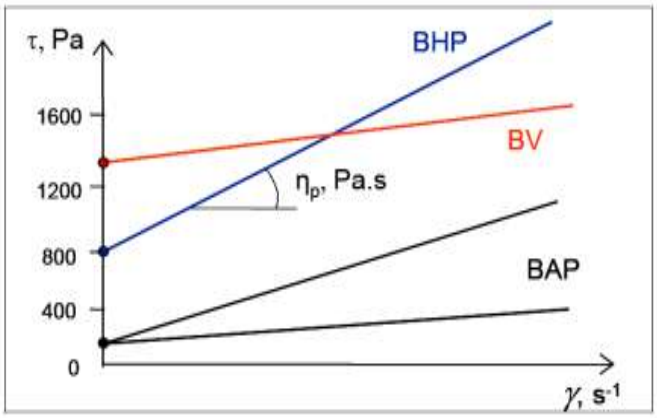


Figure I.28. Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de bétons.

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [De Larrard 96] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b$$

Où **a** et **b** sont des constantes de comportement.

Toutefois, ce modèle est plus exigeant que celui de Bingham car il nécessite la détermination d'un paramètre supplémentaire.

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres.

I. 2- 8-4- Essais de caractérisation sur les bétons autoplaçants (BAPs) :

Plusieurs essais ont été développés pour déterminer les propriétés rhéologiques tant au point de vue de la fluidité que de la ségrégation (essai à la boîte en L, au tube en U et au cône en V, essai d'étalement, divers rhéomètres, essai d'enfoncement de billes, etc.). Certains essais permettent de qualifier soit la fluidité du béton, soit son comportement rhéologique. Pour évaluer la résistance à la ségrégation statique, on est actuellement contraint de faire des mesures sur béton en cours de durcissement ou durci (sciage et comptage de granulats, ultrasons, micro-tomographie 3D, etc…) .**[74]**

a. Etalement :

Cet essai est très simple à faire puisque qu'on utilise le même équipement que pour l'affaissement. Il permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant. Plus l'étalement est élevé, meilleure est la déformabilité. [**24]**

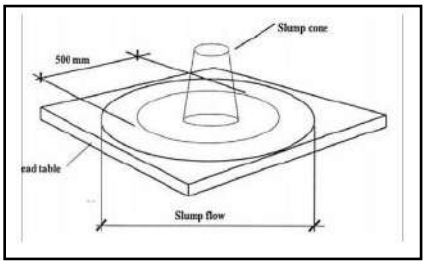


Figure I.29. Mesure de l'étalement.

On vise habituellement un étalement compris entre 600 et 700 mm pour un béton autoplaçant. Il faut cependant noter que cet essai donne seulement une idée de la déformabilité et qu'il faut donc le compléter par un essai mesurant la résistance à la ségrégation ou la capacité de remplissage.

b. Essai de 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 **[24].** Un dessin technique de la boîte est décrit par (la figure I.32).



Figure I.30. La boîte L-BOX.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2 / H1. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellement 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 H1. Cette mesure est plus précise que le rapport H2/H1 mais son utilisation est moins répandue.

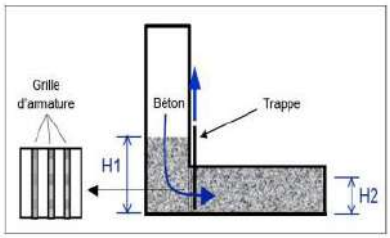


Figure I.31. Mesure du taux de remplissage (H2/H1 ≈ 80%).

c. Essai de Stabilité au tamis :

C'est un essai de qualification des bétons autoplaçants face au risque de ségrégation.

Il consiste à déposer deux litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5mm d'ouverture. **[24]**

Après 5minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2L donne l'indice de ségrégation. On vise un indice de 30% au plus pour un béton autoplaçant [AFGC, 2000].



Figure I.32. Tamis de 5mm + fond - Mesure de la laitance.

d. Essai d'étalement modifié (essai J-ring) :

Le test au J-ring est une conception de GTM Construction. Il a pour but de considérer le comportement du béton face au blocage dans les armatures selon la déformabilité du BAP

suivant un écoulement pareil à celui rencontré avec l'étalement au cône d'Abrahams. Le nombre d'armatures peut être modifié selon l'essai souhaité.

Le comportement au blocage du béton est quantifié par le diamètre d'étalement sJ et le coefficient stJ qui est la différence des hauteurs moyennes du béton entre la surface du béton dans le cône formé et celle du béton qui se trouve à l'extérieur des armatures du J-ring: **[24]**

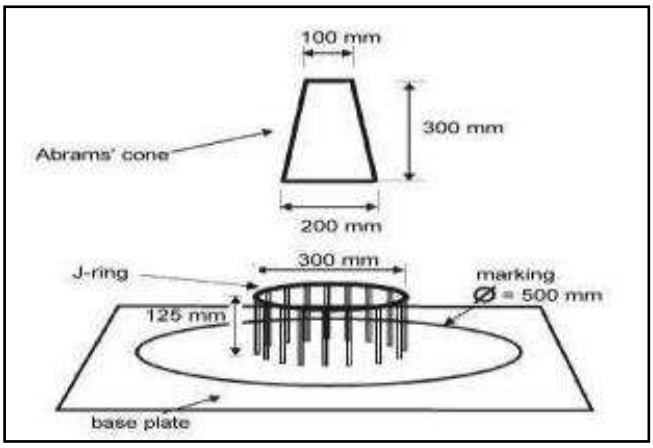


Figure I.33. Essai J-ring (par GTM Construction).

On peut également déterminer le temps d'écoulement T500 qui indique le taux de déformation pour une distance d'écoulement définie et un obstacle donné.

e. Essai de l'entonnoir (V-funnel/Orimet)

Le dispositif expérimental du test de l'entonnoir est décrit sur la Figure suivante :

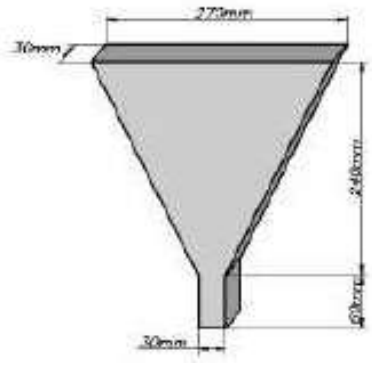


Figure I.34. Test à l'entonnoir (V-funnel/ Orimet)

Le temps d'écoulement dans un V-funnel peut caractériser les trois paramètres rhéologiques d'un béton autoplaçant. Il peut alors être utilisé seul pour déterminer l'autoplaçance. Dans le cas d'un blocage causé par une grande quantité de granulats ou de la

ségrégation, le V-funnel conduit à des temps d'écoulements relativement plus grand qu'avec un Orimet car l'orifice est de 80mm. C'est pourquoi un Orimet est plus approprié pour la détermination de la capacité de passage et de la ségrégation. Pour cette raison, le V-funnel est une meilleure méthode pour tester la capacité de remplissage.

f. Essai à la boîte en U :

Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP

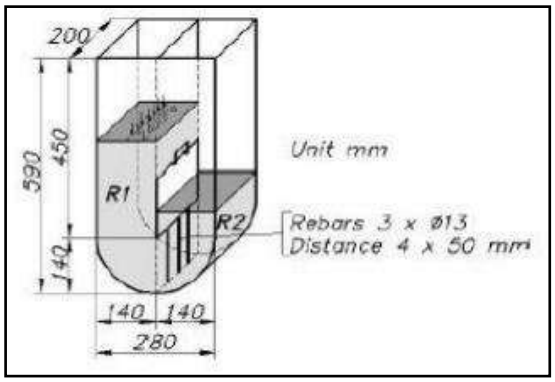


Figure I.35. Essai à la boîte en U (ou U-box).

Une boite transparente en forme de U est séparée en son milieu par des barres d'armature (13mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre) et d'une porte coulissante. Apres avoir rempli un coté de la boite avec du béton frais, on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa. On fait ensuite coulisser la porte pour laisser passer le béton.

La hauteur qu'atteindra le béton de l'autre coté des barres d'armatures sera l'indicatif de lacapacité de remplissage. **[24]**

I. 2- 9- Propriétés du béton à l'état durci :

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés. **[72]**

I. 2- 9-1- Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques **[72].**

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.

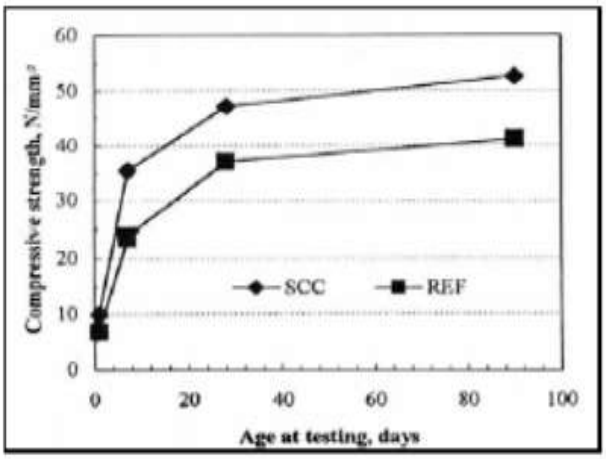


Figure I.36. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF).

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. **[75]**

I. 2- 9-2- Résistance à la traction :

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. **[72]**

I. 2- 9-3- Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats Si on se réfère à la formule réglementaire du module (Eij = 11000 fcj $^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré. **[72]**

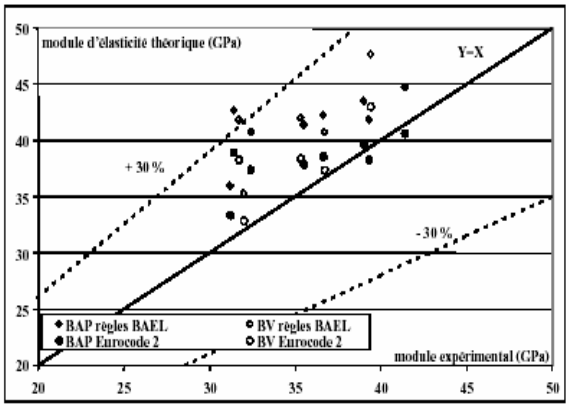


Figure I.37. Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales. [72]

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante Jaccob et Hunkeler ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est du au petit dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment.

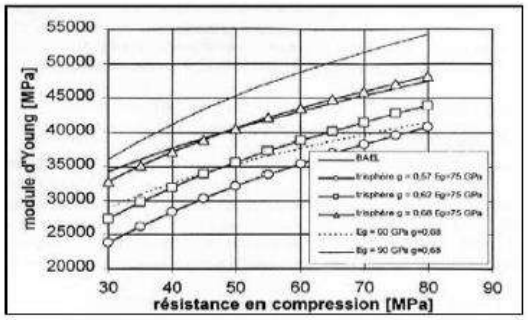


Figure I.38. Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèleréglementaire et un modèle d'homogénéisation. [72]

I. 2- 9-4- Retrait :

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-200µm/m) que celui des BV.

Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ;sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un coté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l 'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP. **[72]**

Ogawa et Al , constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'il contiennent est plus importante.

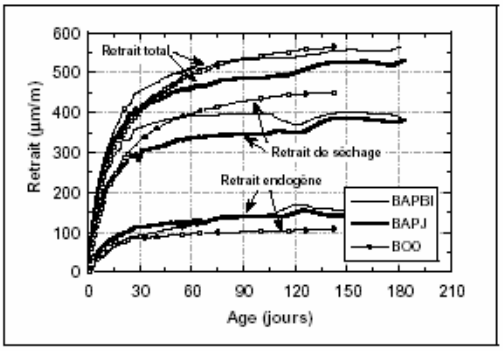


Figure I.39. Retraits des BAP B1 (E/C=0,50), BAP J(E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45). [72]

I. 2- 9-5- 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. **[72]**

I. 2- 10- Mise en œuvre du béton :

I. 2- 10-1- Méthodes de mise en œuvre des BAPs :

Les BAP présentent des contraintes de mise en œuvre largement limitées par rapport aux bétons ordinaires vibrés. On rappelle que, dans le cas traditionnel des bétons vibrés, la mise en œuvre doit se faire par couches d'au plus 50 cm (proportionnées à la hauteur du corps des aiguilles vibrantes), avec une hauteur de chute inférieure à 1,5 m et en évitant de déplacer le béton par effet de la vibration sur une distance de plus de 2 m. **[69]**

Pour les BAP, on admet des hauteurs de chute jusqu'à 5 m (le béton est beaucoup plus résistant à la ségrégation) et des déplacements horizontaux dans le coffrage de 5 à 10 m (suivant la résistance à la ségrégation du BAP et la densité de ferraillage).

Ceci permet une mise en œuvre beaucoup plus rapide, toutefois généralement limitée par la vitesse maximale de montée dans le coffrage (pour des questions d'évacuation des bulles d'air qui s'échappent par gravité, lors de la mise en œuvre du BAP, ou de limitation de la poussée exercée sur les coffrages).

On peut également noter que le délai de recouvrement entre couches de BAP, dans le cas :

- **D'applications horizontales**, doit être suffisamment faible pour qu'un mariage correct puisse se faire (certaines formulations ayant tendance à se gélifier rapidement). Ceci peut impliquer des cadences de mise en œuvre élevées lorsque les surfaces concernées sont importantes.

- **Pour les applications verticales**, la mise en œuvre peut se faire par le haut du coffrage (à la benne ou à la pompe) comme pour les bétons ordinaires vibrés, ou par le bas (injection par pompage). Cette dernière possibilité permet d'automatiser la mise en œuvre et de limiter le personnel en charge du bétonnage

- **Pour les applications horizontales**, l'avantage des BAP réside dans leur facilité de nivellement et de réglage. Les opérations de réglage et de talochage traditionnelles sont supprimées et remplacées par un traitement de surface (à la pénibilité moindre puisqu'il se fait en station debout) à la barre dite « de débullage ».

I. 3- Bétons fibrés:

Introduction :

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. **[76]**

La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie **[77].** Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée.

Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation.

Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse. **[77]**

I. 3- 1- Fibres :

I. 3- 1-1- Introduction :

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, béton autoplaçants et du béton projeté. Fabriquées à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose) ou autres, les fibres sont disponibles en diverses formes (rondes, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6 mm et 150 mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75mm .Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage. Les principaux facteurs qui contrôlent la performance d'un matériau composite sont : **[24]**

a) Les propriétés physiques des fibres et de la matrice.
b) L'adhérence entre les fibres et la matrice.

Bien que les principes de base soient les mêmes, il existe plusieurs différences caractéristiques entre les armatures conventionnelles et les systèmes à base de fibres :

- Les fibres sont généralement distribuées à travers toute une section donnée tandis que les barres d'armature ou les treillis d'armature sont disposés seulement là où ils sont requis;
- La plupart des fibres sont plutôt courtes et peu espacées, contrairement aux barres ou aux treillis d'armature en continu;
- En général, il n'est pas possible d'obtenir le même rapport entre la surface de renforcement et la surface de béton que celui obtenu en utilisant un réseau de barres d'armature ou de treillis. La plupart du temps, un faible volume de fibres est ajouté au béton (moins de 1 %), ce qui s'avère efficace pour réduire la fissuration due au retrait plastique.

En général, les fibres ne modifient pas le retrait libre du béton, cependant, à des dosages assez Importants, elles peuvent augmenter de façon significative la résistance e à la fissuration et réduire la largeur des fissures.

I. 3- 1-2- Définition des fibres :

Le terme ―Fibre‖ se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu. **[24]**

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

I. 3- 1-3- Différents types de fibres :

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- Fibres minérales : verre, carbone ;
- Fibres métalliques : acier, inox, fonte ;
- Fibres organiques : polypropylène, acrylique ;
- Fibres naturelles : Hévéa, Sisal…

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur…), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée…), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibre. **[24]**

a. Fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre au béton une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (Fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête d e clou) **[24]**

b. Fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque, d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3 mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs.] **[24]**

c. Fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton. **[24]**

d. Fibres de polypropylènes :

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent les avantages suivants : **[24]**

- Disponibilité à prix relativement faible ;
- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs ;
- Augmentation notable de la résistance de la résistance aux chocs ;
- Limite l'ouverture des fissures.

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux.

I. 3- 1-4- Propriétés mécaniques des fibres :

a. Gel – dégel :

La fibre ne devrait pas être considérée comme un substitut des manœuvres prévues pour obtenir une résistance au gel – dégel. Cependant le nombre limité de micro fissurations et la meilleure uniformité du béton renforcé de fibres dosées augmentent la résistance aux cycles gel – dégel, diminuant de conséquence les lézardes en surface. **[28]**

b. Abrasion :

Grâce à un meilleur contrôle de l'eau de mélange empêchant la concentration de particules fines en surface, le béton renforcé de fibres dosées possède de meilleures caractéristiques d'uniformité. Cela se traduit par une meilleure résistance aux contraintes mécaniques **[28]**

I. 3- 1-5- Critère de choix du type de fibres :

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

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles). **[76]**

Leur géométrie est très variable (figure I.40). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites.

C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre **[78]** et par frottement à l'interface avec la matrice.

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

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

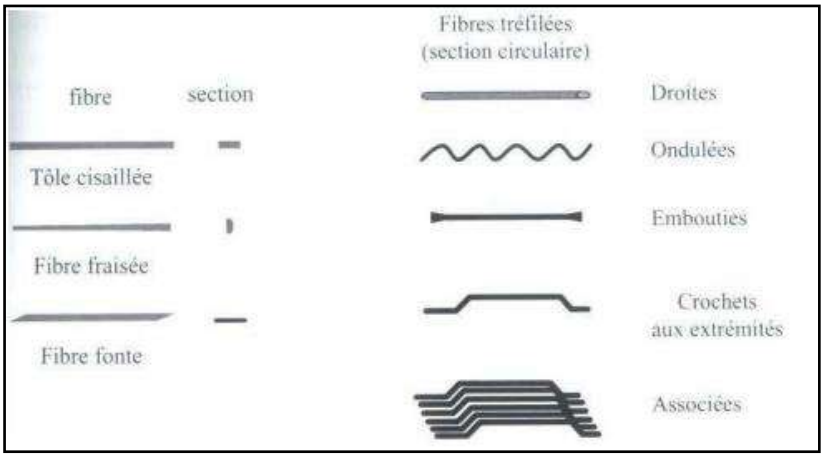


Figure I.40. Différentes formes géométriques de fibres métalliques. [77]

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) **[77].** Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

I. 3-2- Composition des bétons de fibres :

Les bétons renforcés de fibres ont fait l'objet depuis maintenant une quarantaine d'années d'efforts de recherche importants. Le développement depuis une dizaine d'années de matrices cimentaires performantes a relancé l'intérêt pour l'utilisation des composites cimentaires renforcés de fibres. **[79]**

On obtient des produits plus ductiles, multifissurants, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

Ces matériaux sont très récents pour un secteur comme le génie civil, ou innover est difficile.

Les composites « ciment - fibres » et « bétons - fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation, mobilier urbain…

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections.

Le béton est un matériau poreux et fragile, doté d'une faible résistance à la traction donc sujet à la fissuration. C'est un matériau composite, donc un solide polyphasé dans lequel tous les constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne peuvent pas atteindre.

Le renfort donne de la résistance mécanique, alors que la matrice unit les fibres, conserve la disposition géométrique des fibres, leur transmet les sollicitations et les protège de l'environnement.

I. 3- 2-1- Critère de choix du type de fibres :

La fabrication d'un béton de fibres ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant **[24].** 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 **[80],** 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 matricedonnée (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. 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 qui rendent difficile la mise en oeuvre 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.

Le cahier des charges d'un béton de fibres métalliques est en général le suivant :

- Un type et une quantité de fibres choisis (en relation avec le comportement en traction visé) ;
- Une taille maximale de gravillon déduite de la relation L > 2D (avec un diamètre N maximum le plus gros possible pour des raisons économiques et de compacité) ;
- Une résistance à la compression à 28 jours ;
- Une maniabilité (temps d'écoulement) correspondant à l'application visée.

Une méthode rationnelle de formulation a été mise au point au cours des années 80.

Elle a pour point de départ la méthode Baron - Lesage de formulation des bétons. Elle est basée sur les deux postulats suivants :

Pour un rapport (massique) eau sur ciment (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.

On fait l'hypothèse supplémentaire que cela reste vrai dans le cas des bétons de fibres.

I. 3- 2-2- Béton renforcé de fibres en phase d'hydratation :

L'étude du comportement des matériaux cimentaires au jeune âge est primordiale. Lors du gâchage du béton, de nombreuses réactions se produisent. Celles-ci dépendent de la composition du béton et des conditions environnementales. Il va sans dire que le comportement du matériau à long terme dépend de cet historique qu'il est donc nécessaire de maîtriser. **[76]**

I. 3-3- Influence du dosage en fibres:

I. 3- 3-1- Optimisation rhéologique :

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation non préférentielle.
La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop courte, les fibres ne peuvent pas se repartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.
La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élancement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.
Lors de la mise en place dans les moules, il faut limiter l'écoulement qui est responsable de l'orientation préférentielle des fibres dont nous parlerons plus spécifiquement dans le paragraphe suivant. L'orientation peut aussi être due à la vibration qu'il est important de limiter voir de supprimer en travaillant avec des bétons autoplaçants et à l'effet de paroi, ce dernier étant plus difficile à contourner.

I. 3- 3-2- Optimisation mécanique:

La quantité de fibres dans un béton est une caractéristique prépondérante vis-à-vis du comportement post fissuration. Soit deux fibres, l'une perpendiculaire au plan d'une fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure. Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire étant plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles. En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de

la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien (c'est-à-dire provoquer une étreinte autour de cette fibre), cette dernière verra donc son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier de synergie positive.

Au contraire, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de pâte de ciment qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant (même si l'on augmente la quantité de pâte de ciment avec le pourcentage de fibres pour des raisons de maniabilité) pour assurer un fonctionnement correct de l'interface pâte-fibre. Les fibres travailleront moins efficacement que si elles avaient travaillé sans interactions. Le bilan est alors la somme de leurs actions individuelles moins un effet qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moi ns elles seront efficaces individuellement, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution.

I. 3-4- Influence de l'orientation préférentielle des fibres :

Plusieurs études ont été effectuées afin de montrer l'influence de l'orientation préférentielle des fibres sur le comportement mécanique des bétons **[81]**. Casanova, **[82]** après avoir coulé un bloc de béton en orientant les fibres verticalement, a carotté ce bloc dans trois directions. Il a ensuite effectué des essais de flexion 3 points et ainsi caractérisé l'influence de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus sont présentés sur la (figure I.41)

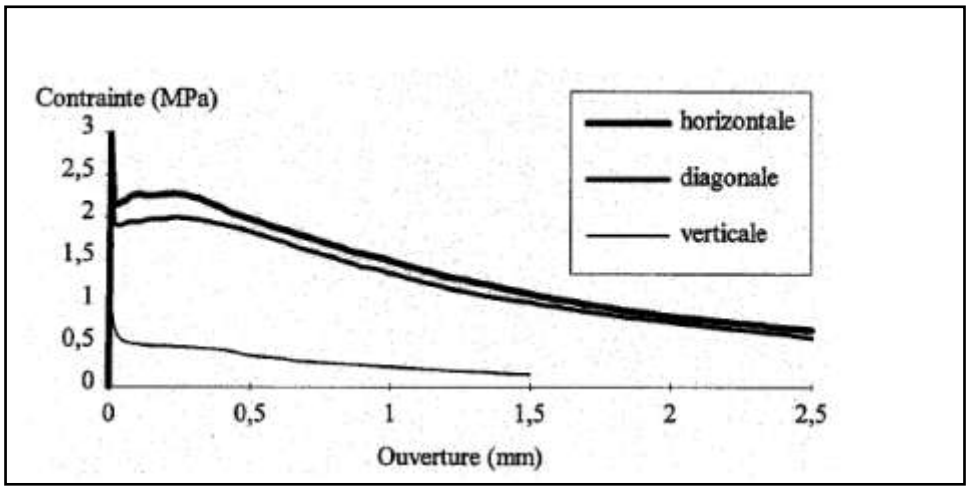


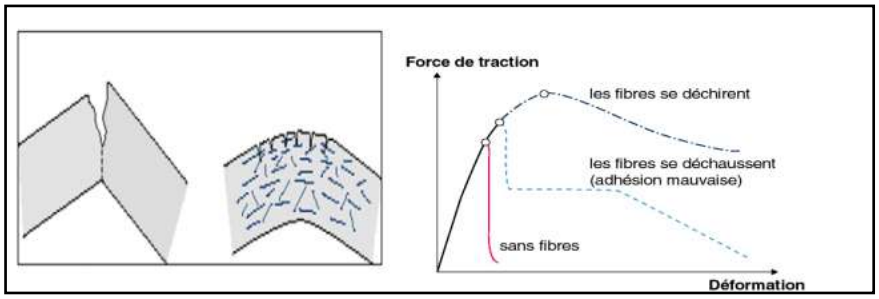
Figure I.41. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion. [82]

Lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe de la fissure (cas de l'orientation horizontale), les fibres jouent leur rôle de couture de la fissure et permettent d'obtenir des résistances résiduelles importantes pour de grandes ouver tures de fissures. A l'inverse, lorsqu'elles sont orientées parallèlement à l'axe de la fissure, il n'y a pas, ou peu, de fibres pour coudre la fissure, on retrouve donc un comportement post fissuration semblable à celui d'un béton sans renfort de fibres. Le cas des fibres orientées en diagonales montrent que celles-ci cousent aussi la fissure et permettent d'avoir un comportement post fissuration intéressant mais un peu moins important que celui des fibres orientées de façon optimale. Pour éviter une orientation préférentielle des fibres, il convient de prendre un maximum de précaution lors du coulage du béton pour bien les répartir dans l'élément. Une solution consiste à modifier les bétons afin qu'ils deviennent autoplaçants et qu'ils ne nécessitent plus de vibration. Il faut être aussi prudent lors du coulage et éviter de faire parcourir au mélange des distances importantes aussi bien dans les manchons que dans les coffrages. Les conclusions des essais de laboratoire sont à considérer avec précaution si on ne peut pas reproduire par la suite les conditions de mise en place in-situ.

I. 3-5- Rôle des fibres :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité **[83].** Il n'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, comme schématiquement illustré par la (Figure 42-a).
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure 42-b).



a) **b)**

Figure I.42. Illustration de l'apport du renfort par des fibres. [84]

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

- l'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire ;
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post –fissuration ;
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge ;
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion ;
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion.

I. 3-6- Principe D'action Des fibres :

Le principe d'action des fibres se manifeste à deux échelles :

Le matériau et la structure. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction **[81].** On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (Figure I.43). Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice.

La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives. La deuxième phase correspond au développement des macrofissures qui résultent de la coalescence des microfissures.

A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une macrofissure (phase

3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette **[85] [86] [87] [88]**

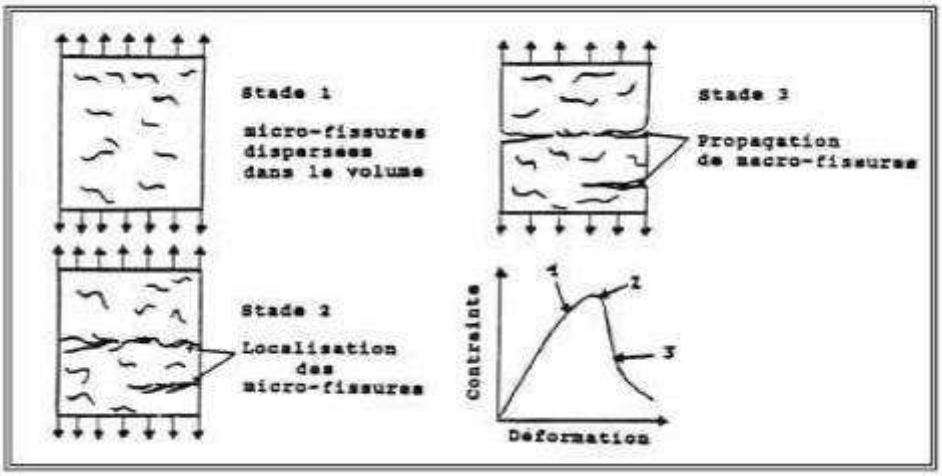


Figure I.43. Processus de fissuration du béton. [89]

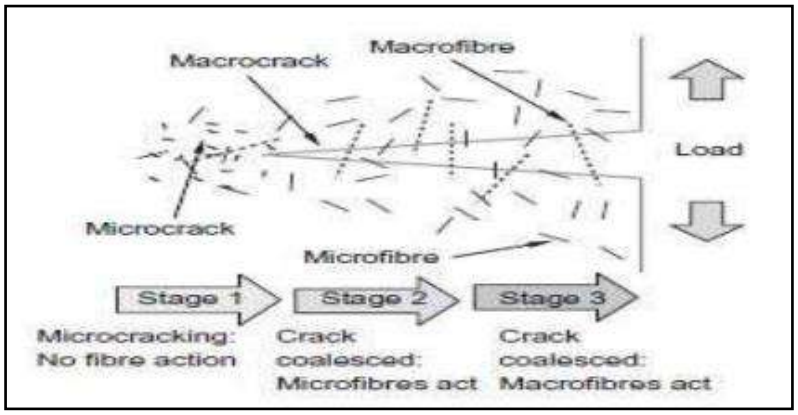


Figure I.44. Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite. [90]

Le mécanisme de couture des fibres assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et confère ainsi une ductilité au béton**. [91]**

Le but principal du renfort par des fibres est d'augmenter la résistance à la traction et la ductilité du béton, alors que pour les fibres sont introduites non pas dans le but d'améliorer la résistance à la traction, mais essentiellement pour contrôler la fissuration et changer le comportement du matériau fissuré en pontant les fissures **[92].**

Sous un effort de traction, les fissures se développent dans la matrice et les fibres peuvent les coudre, et ainsi augmenter la résistance à l'ouverture des fissures et retarder leur

propagation. Pendant l'ouverture des fissures, les fibres vont, suivant leur nature et leur capacité d'adhérence avec la matrice, plus ou moins se déformer ou glisser.

Dans une structure, l'idéal est que la capacité à la traction des fibres soit utilisée de façon optimale dans ce processus, c'est à dire jusqu'à un niveau qui est proche de la résistance à la rupture de la fibre.

I. 3-7- Comportement Mécanique des bétons Renforcés de fibre :

On se propose d'analyser le comportement mécanique des bétons de fibres tel qu'il est rapporté dans la littérature, à la lumière des mécanismes physiques décrits ci -dessus.

Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres **[81].** La démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres. On conçoit donc qu'on ne compare pas, en termes de maniabilité, ni de résistance, des bétons identiques. Rossi propose donc de comparer des bétons optimisés en termes de maniabilité (donc de compacité): on formule, d'une part, un béton témoin et, d'autre part, un béton de fibres, tous deux par la méthode Baron - Lesage en gardant la même valeur du rapport e/c et les mêmes constituants de la matrice (en nature mais pas en quantité), et on compare des bétons ayant la même maniabilité **[93]**

I. 3-7-1- Résistance à la compression :

a. Comportement en compression uniaxiale :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité **[94].**

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences.

Cependant, ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution.

Enfin, il faut rappeler l'influence de l'orientation préférentielle des fibres. Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle p arallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum. **[94]**

Des essais en compression biaxiale ont montré que le contrôle de la fissuration par les fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de l'effort maximal appliqué **[94]**

I. 3-7-2- Résistance à la flexion:

Les essais de flexion qu'on appelle aussi « traction par flexion » ont l'avantage de retranscrire de manière plus réaliste ce qui se passe dans beaucoup d'éléments structuraux. **[94]**

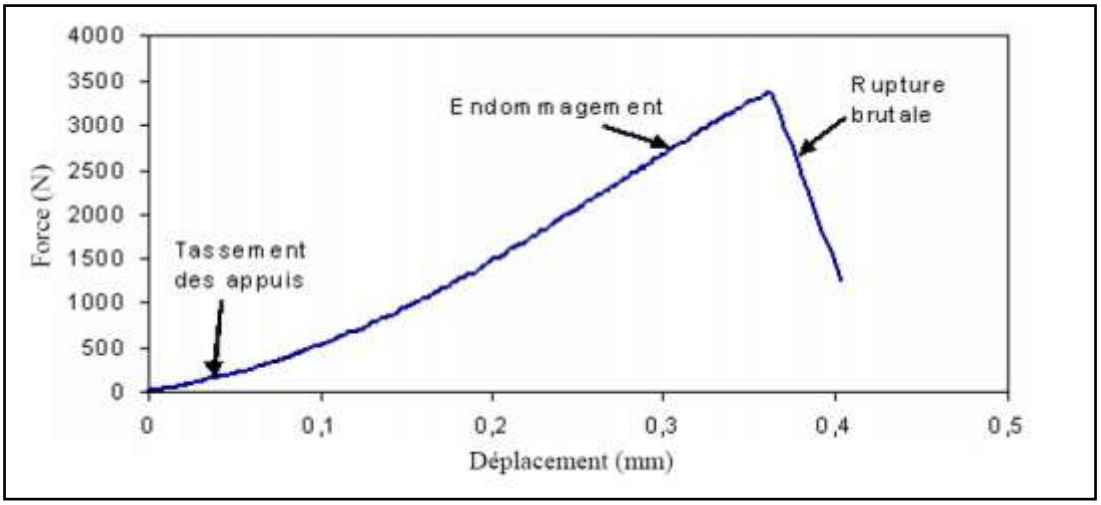


Figure I.45. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières). [95]

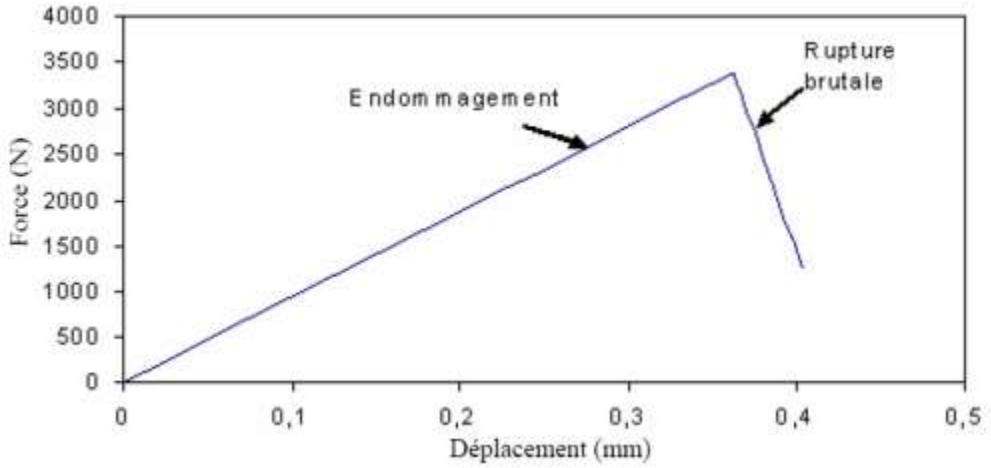


Figure I.46. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (avec des précautions particulières). [95]

Cette dernière figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour le béton, obtenue à partir d'essais statiques en flexion 3-points. L'évolution de la charge se déroule en deux phases : dans la première phase, la force augmente linéairement avec le déplacement pour atteindre la charge maximale, cette phase entraîne la propagation de microfissures d'interface et la propagation de microfissures dans la matrice; dans la deuxième phase une diminution brusque de la charge est observée, conduisant à la rupture de l'éprouvette.

I. 3-7-3- Comportement en traction :

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macrofissuration :

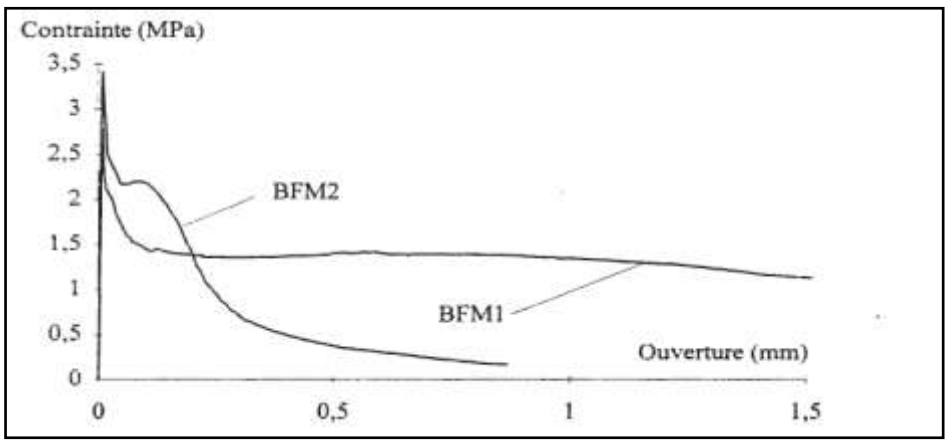


Figure I.47. Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée, pou une fibre fonctionnant par ancrage de forme (BFM1 : fibres à crochets en acier tréfilé -longueur 60 mm, diamètre 0,8 mm- dosées à 50 kg/m3; f c = 27,5MPa) et une autre par adhérence (BFM2 : fibres rubans en fonte amorphe -longueur 30 mm, largeur 1,7 mm- dosées à 30 kg/m3; fc = 40 MPa). [95]

De nombreux auteurs utilisent des essais de traction "indirecte": l'essai de fendage ou l'essai dit de "module de rupture" (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint). Le problème est qu'on cherche à tirer de ces essais une résistance intrinsèque à la traction, alors qu'ils intègrent un mécanisme de structure. On mesure donc, indirectement, l'effet de couture des fibres à travers une macrofissure, mais cette mesure est soumise à des effets d'échelle importants.

Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure. La (Figure I.48) montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe.

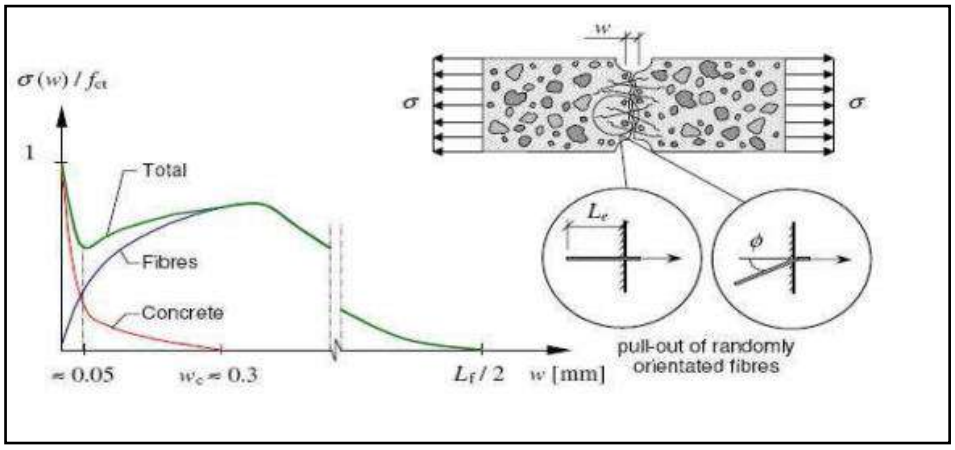


Figure I.48. Contribution des fibres dans le comportement à la traction. [96]

I. 3-7-4- Comportement en fatigue :

a. Phénomène de fatigue :

On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une structure soumise à des sollicitations fluctuantes ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui progressent avec le nombre de cycles appliqué. Ce processus à caractère irréversible altère les propriétés mécaniques macroscopiques du matériau et peut conduire à la rupture pour un niveau de chargement inférieur à sa résistance statique si le nombre de cycles appliqué est suffisant. **[94]**

La représentation classique des résultats d'essais de fatigue est la courbe de fatigue ou la courbe de Wöhler (fig. 61). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à un niveau de sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée. **[94]**

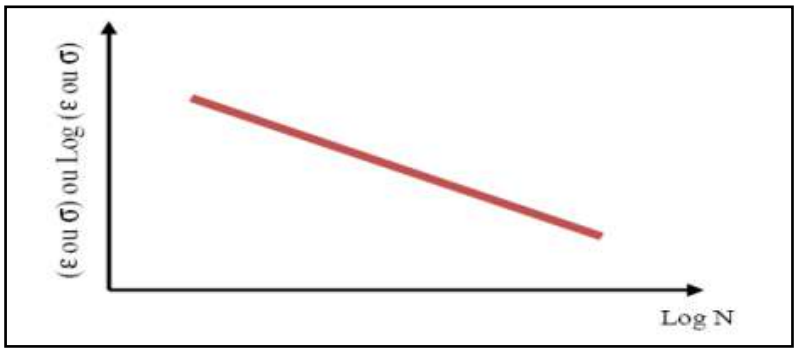


Figure I.49. Courbe de Wöhler

b. Types de sollicitations dans les essais de fatigue :

La tendance générale est d'utiliser des sollicitations simples comme un chargement sinusoïdal avec ou sans période de repos.

Les signaux de la (figure I.50) sont des cas particuliers de sollicitations qui sont exercées uniquement en compression (typiquement utilisées dans l'essai de traction indirecte).
Par contre dans la plupart des essais de fatigue, les sollicitations sont centrées pour obtenir un chargement du type traction/compression alternée. En ce qui concerne la forme du signal, mis à part celles montrées dans la (figure I.50), il existe aussi d'autres types des chargements (triangle, trapèze …), ou une combinaison de ces différents signaux.

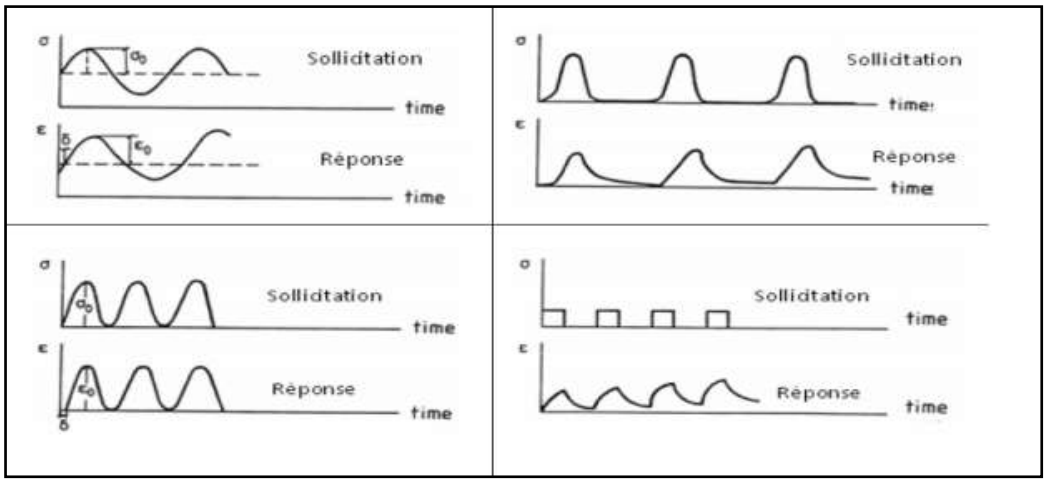


Figure I.50. Quelques signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue. [97]

I. 3-8- Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres :

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques différentes selon leur nature. Chaque type de fibre peut présenter une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications spécifiques.

Le choix du type de fibres utilisées est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. S'agissant de la nature, la fibre métallique est la plus utilisée.

Dans le cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement.

La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post -fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité (voir Figure 51 a et b) **[81].**

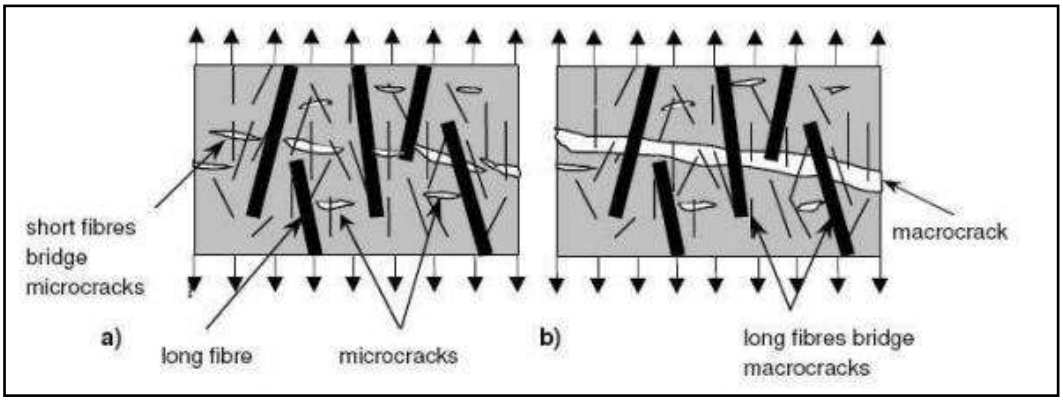


Figure I.51. Processus de couture :

a) Influence des fibres courtes dans le processus decouture des microfissures.

b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures. [98]

I. 4- Bétons Autoplaçants Fibrés (BAPFs) :

I. 4-1- 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. **[81]**Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs sont montrés 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 **[99].**

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. **[100]**

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 essaisont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré).

I. 4-2- Propriétés des Bétons Autoplaçants Fibrés à l'état Frais :

Une étude réalisé par Grunewald un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres**, [101]** du type de fibres (métallique et polypropylèneavec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat. Pour la composition déréférence, le rapport sable/granulats 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. **[81]**

I. 4-2-1- Essai de 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 composition du béton de référence. Plus la teneur en sable est élevée, plus l'étalement est affecté. On remarque aussi sur la Figure 64-a une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions (voir Figure 64-b) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a ét é remarquée. La (Figure 52-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 (ex : Dramix 65/40 BN).

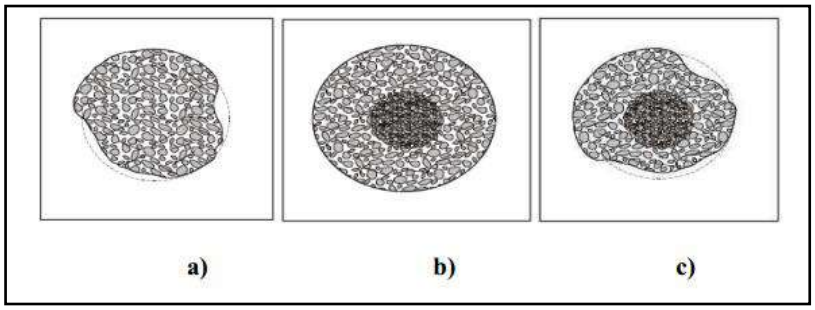


Figure I.52. Effets des fibres sur l'étalement des BAP. [102]

Sachant que l'élancement (Lf/Df) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, [Grünewald et Walraven 2001a] **[102]** se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres Vf et l'élancement. La (Figure 53) décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres. 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.

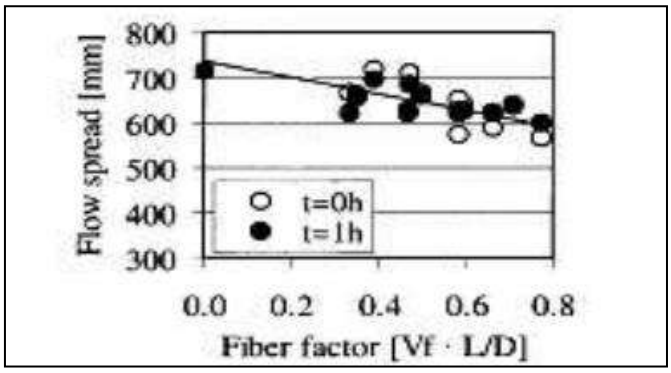


Figure I.53. L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [102].

I. 4-2-2- 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. La (Figure 54) montre que les temps de passage à travers l'entonnoir à t =1h sont nettement plus élevés qu'à t =0h.

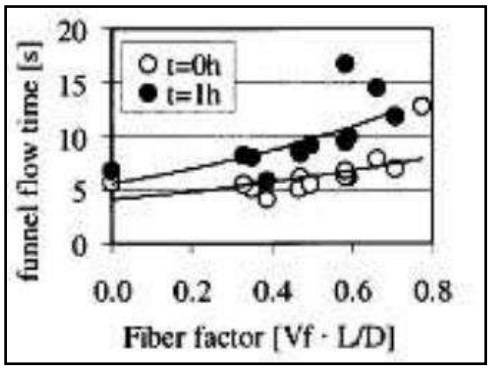


Figure I.54. L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres. [102]

I. 4-2-3- 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.

Tableau I.8. Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAP fibrés [103] :

c/L_f [-]	L_f/d_f [-]	Max. m_f [kg/m^3]
≥ 3	80 65	30 60
≥ 2	65 45	30 60
≥ 1,5	45	30

Avec **c** : espacement entre les barres.

m_f : dosage en fibres (kg/m3 de béton).

I. 4-2-4- Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique):

D'après une étude réalisée par Grünewald et Walraven **[102]** 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. 4-3- Orientation et la distribution des fibres :

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Petersson **[104]** 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 **[105]** 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 lam ême 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.

- **Concentration critique de fibres :**

Swamy et Mangat **[106]** ont montré l'existence d'une concentration critique de f ibres 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 **[107] [108] [109] [110]** qui notent sur BO ou sur BAP un effet accru des fibres sur l'étalement, ou une augmentation soudaine du seuil mesurée au rhéomètre, au delà d'une certaine concentration de fibres. D'une part pour des concentrations supérieures à cette valeur critique, 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.

L'essai présent (Figure 55) est réalisé sur une même pate de ciment divisée en trois parts et renforcée avec des fibres droites rigides de concentrations et facteurs d'aspect diffé rents. Sur la figure (a), la pate de ciment renforcée avec 5% (en volume) de fibres de facteur d'aspect 17 semble s'écouler librement et donc présenter des propriétés rhéologiques permettant sa mise en œuvre. Sur la fi gure (b), cette même pate de ciment renforcée avec 20% des mêmes fibres est devenue trop ferme pour s'écouler. En fin sur la figure (c), les fibres utilisées, d'un élancement supérieur (r=60), entrainent la formation d'oursins de fibres constatée par

de nombreux chercheurs **[99] [111] [112] [113] [114]** malgré une concentration de 5% identique a celle de la figure (a). Ces oursins rendent le matériau hétérogène et donc impossible à utiliser sur chantier.

Notre objectif, a partir de cette observation, est de définir une concentration critique au delà de laquelle les fibres empêchent la mise en œuvre du composite. Grünewald **[107]** a observé qu'un BAP devait satisfaire des critères relatifs a son étalement (taille et forme) et sa stabilité pour.

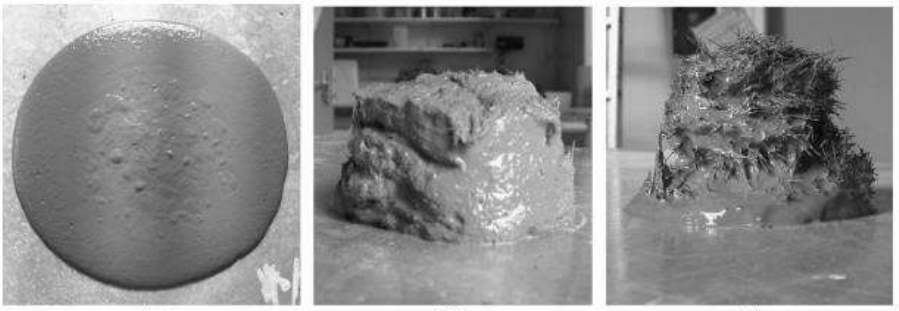


Figure I.55. Illustration de la consistance de pates de ciment renforcées avec des fibres de facteurs d'aspect et concentrations différent (a) _f = 5% et r = 17, (b) _f = 20% et r = 17, (c) _f = 5% et r = 80.

I. 4-4- 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. Dans cette partie, nous nous limiterons au comportement instantané. Le retrait et le fluage peuvent être, considérés comme similaires à ceux des compositions ordinaires. **[81]**

I. 4-4-1- Comportement à la flexion :

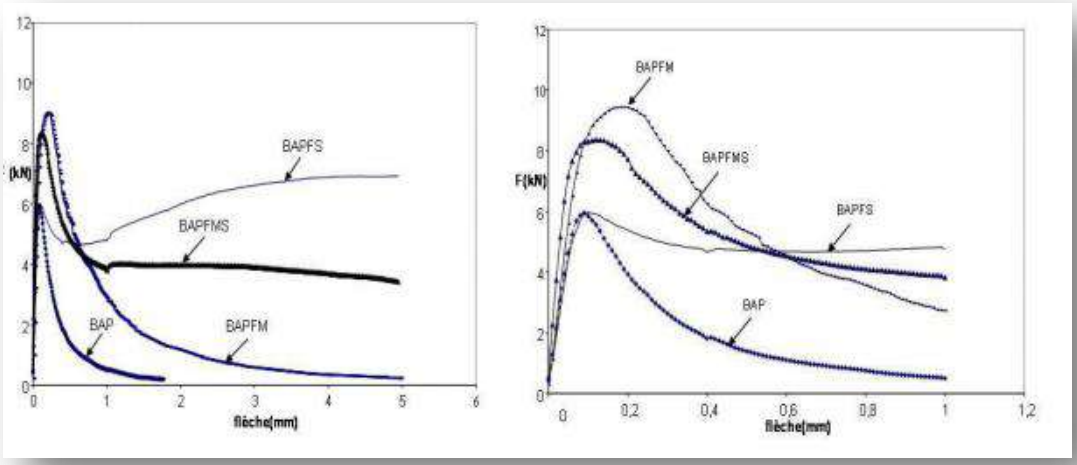
Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres **[100].** Les études **[115] [116] [117]** effectuées sur le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres Pour un fibrage mixte ont montré que :

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 ci dessous illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en terme de courbe force-flèche



a) détail jusqu'à une flèche de 6mm b) détail jusqu'à une flèche de 1mm

Figure I.56. Courbe effort-flèche pour différentes compositions. [115]

Une étude réalisée par Kawamata a montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliorait 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%.

I. 4-4-2- Comportement à la compression et à la traction :

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP **[115].** 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/L.

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 Rcomp/Rtrac 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.

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.

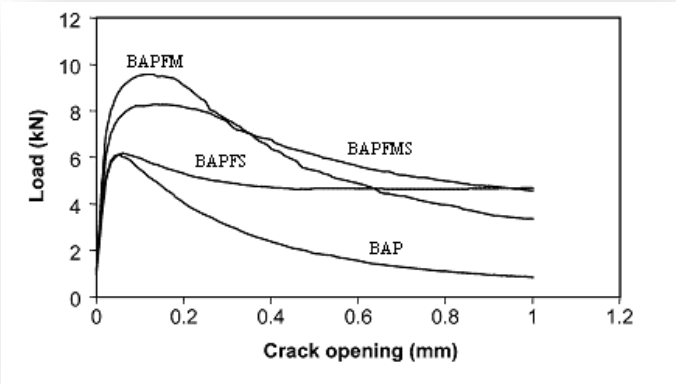


Figure I.57. Comportement à la traction de différentes compositions. [118]

I. 4-4-3- Retrait :

Les fibres ne semblent pas modifier le retrait du béton, par contre elles s'opposent à la fissuration provoquées par ce phénomène. Pour un béton ordinaire **[119]** .Les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles sans fibres. Le retrait des BAP fibrés diminue en fonction de l 'augmentation de teneur de fibres. **[72]**

I. 4-5- Utilisation des BAPs Fibrés dans les structures :

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure **[81].**

I. 4-5-1- 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.

Des études ont été réalisées à l'université de technologie de Delft avec pour objectif la production de palplanches précontraintes sans armatures classiques

Le programme était composé de quatre parties:

- Etude préliminaire sur les caractéristiques d'un mortier de haute résistance avec les fibres métalliques ;
- Optimisation d'une géométrie de palplanches, en combinant les aspects structural et économique, (le calcul a indiqué que les palplanches avec des bétons autoplaçants fibrés seraient économiques si le prix de la composition était inférieur à 450 euros/m^3);

La (Figure 58) permet de comparer les palplanches élaborées à base de béton autoplaçant renforcé de fibres (Dramix OL 13/0,16, Vf=125 kg/m3) à celles à base de béton ordinaire : on remarquera une diminution significative de l'épaisseur des éléments fibrés.

Les palplanches précontraintes en béton autoplacant renforcé de fibres présentent plusieurs avantages par rapport celles avec un béton standard : le coulage et le remplissage sont facilités, le stockage exige moins d'espace, et un nombre plus élevé d'éléments peut être transporté avec un camion (plus légers et moins encombrants). Enfin, la mise en place dans la terre est plus aisée (moins de résistance à l'enfoncement dans le sol. **[81]**



Figure I.58. Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b) [81]

I. 4-5-2- 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. A titre d'exemples récents et non des moindres, on peut citer les incendies du tunnel du Mont Blanc et du tunnel sous la Manche. Les fibres peuvent contribuer à limiter la détérioration et la désagrégation du béton. L'interface fibre – matrice cimentaire contribue à la décompression du béton (exutoire de la vapeur) et d'autant plus efficacement que les fibres sont réparties dans tout le volume, y compris au voisinage immédiat de la surface de la structure. Des voussoirs renforcés de fibres métalliques ont été testés avec succès dans plusieurs projets d'infrastructures. Dans la plupart des cas, on peut se passer du renfort de barres, simplifiant ainsi le procédé de production.

La (Figure 59) illustre un voussoir en béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques, et montre la qualité des surfaces après décoffrage.



Figure I.59. Un voussoir à base de BAP fibré. [81]

Des photographies aux rayons X ont été réalisées (Figure 60). Leur analyse met en évidencevl'influence de l'écoulement sur l'orientation préférentielle des fibres. Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- l'écoulement affecte les caractéristiques des B AP fibrés à l'état frais, les fibres sont préférentiellement orientées parallèlement à la direction de l'écoulement, cette orientation devient plus prononcée lorsqu'il s'effectue sur une longue distance ;
- une bonne corrélation a été trouvée entre la résistance à la traction par fendage (meilleur pour des fibres de longueur 60 mm) et le facteur d'orientation.

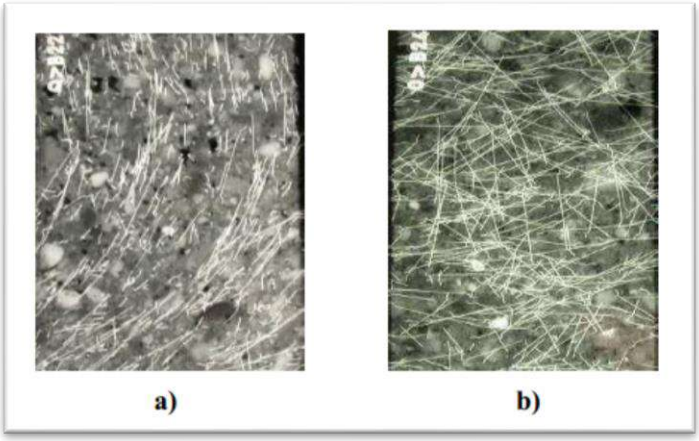


Figure I.60. Photographie aux rayons X au milieu du voussoir le long de l'écoulement (a), perpendiculairement à l'écoulement (b). [81]

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS.

II. 1- Introduction :

Dans ce chapitre on présente les matériaux de construction utilisés pour la confection des bétons 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 autoplaçant de fibres végétales, 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.
- **BAPFM1 :** béton autoplaçant de fibres métalliques industrielles RC-80/50.
- **BAPFM2:** béton autoplaçant de fibres métalliques industrielles FI 50.

Cette étude permet la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur béton frais et sur béton durci. Les différents essais faits sont :

- **Sur béton frais** :
  - Cône d'Abrams.
  - V-Funnel.
  - J-Ring.
  - L-Box.
  - U-Box.
  - Stabilité au tamis.
  - Air occlus.
  - Densité.
- **Sur béton durci** :
  - Essai de compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
  - Essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm.
  - Essai ultrasonique.
  - Essai sclérométrique.
  - Absorption d'eau par capillarité.
  - Retrait 7x7x28 cm.

II. 2- Caractérisation des matériaux utilisés :

II. 2- 1- Le ciment :

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 (Mssila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442].

Le (tableau II.1) résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clincker, selon la fiche technique du ciment.

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 B).

II. 2- 2- Granulats :

II. 2- 2-1- Sable :

Le sable utilisé provient de la région de **Bouguezoul**, c'est un sable roulé ayant un module de finesse de 2.818 (NF P18-304) et un équivalent de sable de 82.53% (NF P18-598), taux d'absorption d'eau 0.5 % (NF P18-555), la masse volumique apparente 1403 kg/m^3 (NF P18-555), La masse volumique absolue 2500 kg/m^3 (NF P18-555).



Figure II.2. Sable de Bouguezoul.

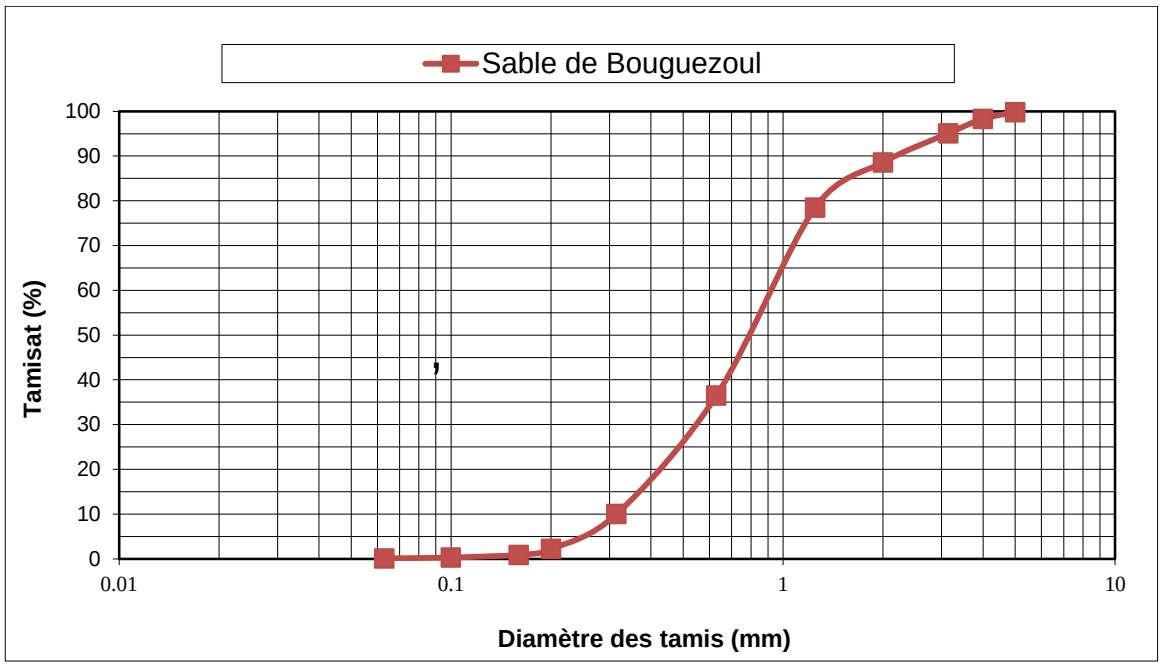


Figure II.3. Analyse granulométrie de sable de Bouguezoul.

II. 2- 2-2- Gravier :

Le gravier utilisé est un gravier concassé à deux classes granulaires (3/8 & 8/15) figure II.4 et II.5 provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berouaguia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au (tableau II.3) et l'analyse granulométrique est présentée dans la (figure II.6).





Figure II.4. Gravier de Mont Guorno 3/8. **Figure II.5. Gravier de Mont Guorno 8/15.**

Tableau II.2. Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés :

Caractéristiques	Fraction 3/8	Fraction 8/15	Normes
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.5	2.53	NF EN 1097-6 [105]
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.29	1.27	NF EN 1097-3 [106]
Taux d'absorption d'eau (%)	1.08	1.62	NF EN 1097-6 [105]
Résistance aux chocs (Los-Angeles)	24.10	26.18	NF EN 1097-2 [108]

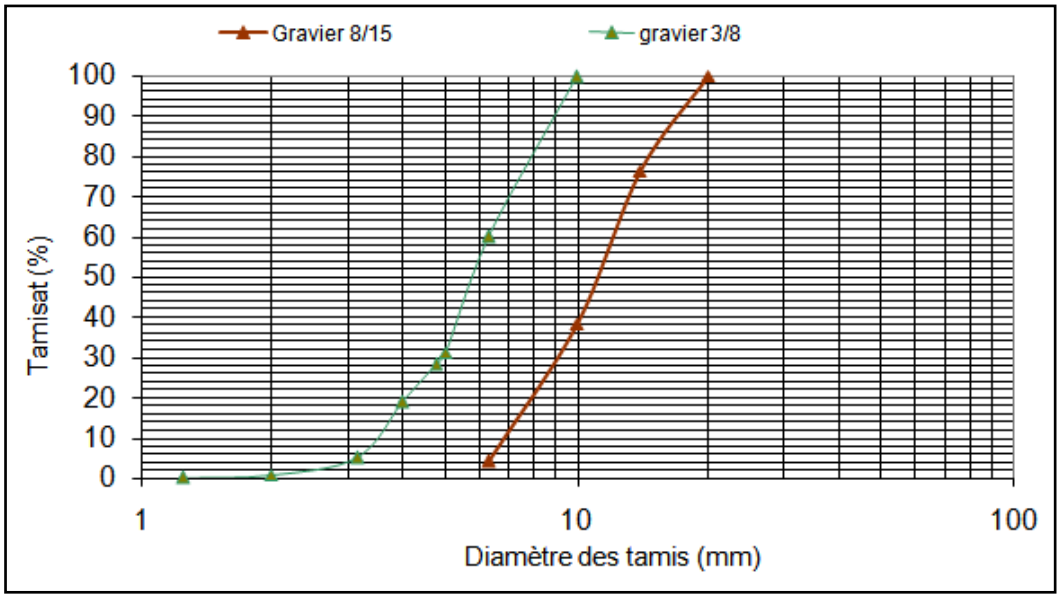


Figure II.6. Analyse granulométrie du gravier 3/8 et 8/15.

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 30 :

Il est à base de polycarboxylates d'ether (PC), sa plage normale d'utilisation est fixé par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment **[109]. (Voir annexe B).** Ses caractéristiques sont :



Figure II.7. (PC) MEDAFLOW 30.

- Aspect …….. Liquide
- Couleur …….. Brun clair
- PH …….. 6 – 6.5
- Densité …….. 1.07 ± 0.01
- Teneur en chlore …… < 0.1 g/l
- Extrait sec …….. 30%

II. 2- 5- Fibres métalliques :

II. 2- 5-1- FIBRES 1 : METAL FIBRES RC-80/50-BN(Sika).

Les fibres SIKA ® METAL FIBRES RC-80/50-BN sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé. Elles sont encollées en plaquettes pour assurer une bonne répartition dans le béton. Elles sont présentées en sac papier de 10 kg.



Figure II.8. Fibres industrielles RC-80/50.

II. 2- 5-2- FIBRES 2 : METAL FIBRES RC-80/50-BN(Sika).

La fibre MEDAFAC est un produit en acier tréfilé. Sa géométrie et ses caractéristiques techniques lui permettent d'offrir au béton une ténacité importante. Grâce à ses propriétés le MEDAFAC permet d'augmenter les résistances mécaniques du matériau. Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Les fibres d'acier MEDAFAC sont conditionnées en carton de 40 kg.





Figure II.9. Fibres industrielles FI50.

Tableau II.3. Fibres industrielles FI 50 :

provenance	MEDAFAC
forme	Bâtonnets ondulés
longueur	50 mm
épaisseur	0.6 + 0.09 mm
Composition chimique Carbone Manganèse Silice Phosphore Souffre	 0.08 – 0.12 % 0.8 – 1 % 0.06% 0.06 – 0.08 % 00
Allongement à la rupture	3 à 4%

II. 3- 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 métalliques sur ces propriétés est analysé en fixant : le rapport Sable/Mortier à 0.52 et le rapport E/C à 0.35 et le pourcentage de superplastifiant à 1.6% pour toutes les compositions. En faisant varier les pourcentages de deux types des fibres métalliques de 0.5% et 0.3% 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 25 litres dans un malaxeur d'une capacité maximale de 50 litres.

Le (tableau II.4) 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.

Tableau II.4. Compositions des différents BAP étudiés (1m³ de béton) :

	BAPT	**BAPFM1 0.3%**	**BAPFM1 0.5%**	**BAPFM2 0.3%**	**BAPFM2 0.5%**
Ciment (kg)	467	467	467	467	467
Sable (kg)	733	733	733	733	733
Gravier 3/8 (kg)	280	280	280	280	280
Gravier 8/15 (kg)	560	560	560	560	560
Eau (kg)	187	187	187	187	187
Superplastifiant (kg) 1.6%	7.47	7.47	7.47	7.47	7.47
E/C	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Les fibres (kg)	0	0.525	0.875	0.525	0.875

Avec :

BAPT : Béton autoplaçant témoin (sans fibres).

BAPFM1 : Béton autoplaçant de fibres indestrielles RC- 8/50.

BAPFM2 : Béton autoplaçant de fibres indestrielles FI 50.

II. 4- Technique expérimentale :

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 figure ( ) ; elle suit les étapes suivantes :

1- 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 (voir Annexe A) ;
2- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant (Annexe A) ;
3- Malaxer le sable, ciment et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
4- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (Eau1 = 70% Eau) ;
5- Ajouter pendant 1 minute le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage (Eau2 = 30% Eau) ;
6- Malaxer pendant 5 minutes et introduire les fibres métalliques qui sont mouillées précédemment, progressivement en pluie au mélange ;
7- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
8- Malaxer pendant 30 secondes.

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

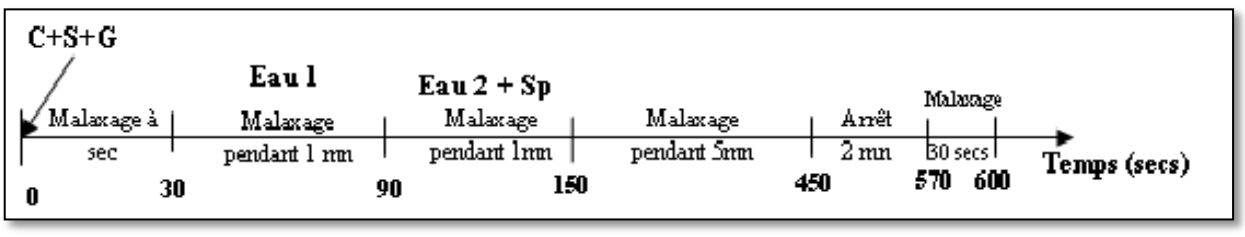




Figure II.10. Séquence de malaxage du béton autoplaçant.

II. 4- 2- Béton frais :

Les essais de caractérisation sur béton frais sont résumes dans le (tableau II.5) Suivant :

Tableau II.5. Essais de caractérisation sur bétons frais :

Mélange	Essais	Appareil	Nombre de gachées
BAPT	ouvrabilité	Cône d'abrams V-Funnel J-Ring L-Box U-Box Stabilité au tamis	5
BAPFM1			
BAPFM2			
BAPT	Densité	-	5
BAPFM1			
BAPFM2			
BAPT	Air occlus	Aéromètre	5
BAPFM1			
BAPFM2			

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});
- Cône d'Abrams 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 réglet de 90cm.

b. Mode opératoire :

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer et centrer le cône d'Abrams 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.11. Développement de l'essai d'étalement.

II. 4- 2-2- Essai J-Ring :

Cet essai permet de donner une indication de la déformabilité et capacité de passage du béton à travers une cage d'armatures.

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});
- Cône d'Abrams ;
- Dispositif J-Ring (Figure II.12) ;
- Chronomètre ;
- Mètre ou réglet de 90cm.

b. Mode opératoire

- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon) ;
- Placer et centrer le dispositif J-Ring et le cône d'Abrams 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 ;
- 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 ;

- Mesurer les différentes hauteurs du béton à l'intérieur au centre (h_0) et à ($h_1$et h_2) suivant la direction X et ($h_3$et h_4) suivant la direction Y à l'extérieur du J-Ring suivant Calculer $\mathbf{h_j}$, (Figure II.12), selon la formule **(2.2)**

$$h_j = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} - h_0 \qquad \textbf{(2. 1)}$$

Détecter visuellement s'il y a des signes de ségrégation de béton (comme blocage à travers les armatures du J-Ring).

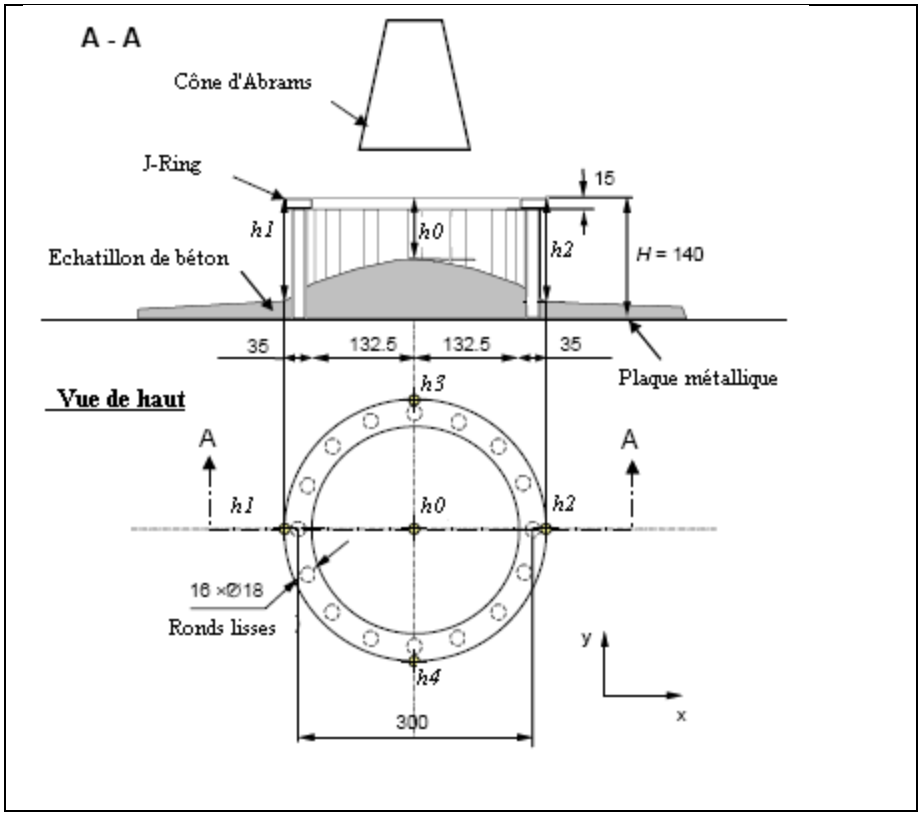


Figure II.12. Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure des hauteurs.



Figure II.13. Protocole de l'essai du J-Ring.

II. 4- 2-3- 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.14)
- 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

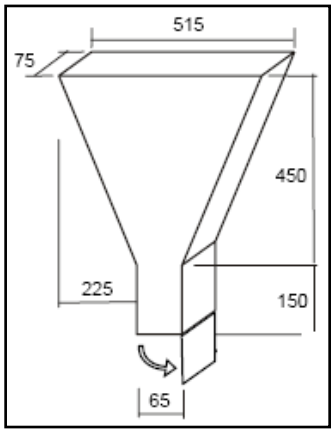


Figure II.14. Dimensions de l'entonnoir en V (V-funnel).



Figure II.15. Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel).

II. 4- 2-4- Essai de la boîte en U (U-Box):

Il permet de tester la mobilité du mélange frais en milieu confiné et contrôler le blocage de béton.

a. Matériel nécessaire :

- La boîte en U dont les dimensions sont définies dans la (figure II.16) ;
- Règle de 60 cm.

b. Mode opératoire

- Prélever un échantillon de béton représentatif ;
- Remplir le compartiment R1 en déversant de manière continue ;
- Soulever la trappe verticalement ;
- Laisser le béton s'écouler dans le compartiment R2 à travers le ferraillage ;
- Mesurer la hauteur de remplissage (Figure II.16)

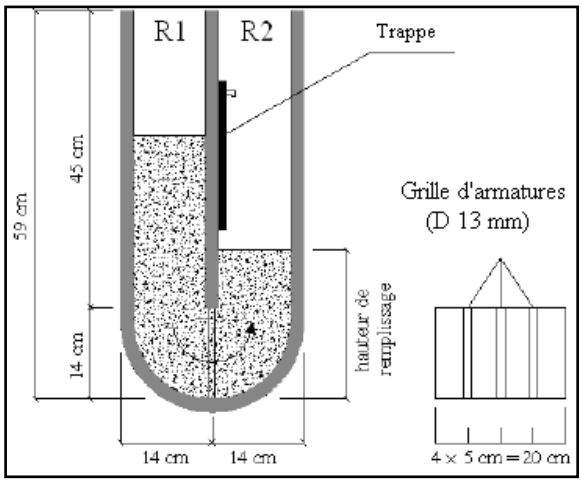


Figure II.16. Dimensions de la boîte en U (U-Box).



Figure II.17. Protocole de l'essai de la boîte de U (U-Box).

II. 4- 2-5- 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 $\mathbf{P}_{laitance} = \mathbf{P}_{fond+laitance} - \mathbf{P}_{fond}$;
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon

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



Figure II.18. Protocole de l'essai de stabilité au tamis.

II. 4- 2-6- 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. Un dessin technique de la boite est décrit la figure II.19.

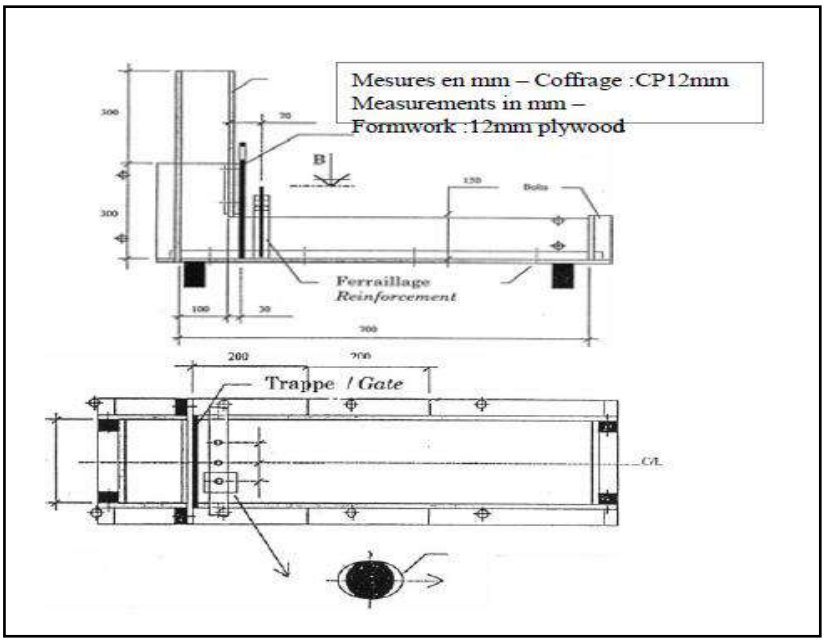


Figure II.19. Protocole de l'essai de L-Box.

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.20. Protocole de l'essai de la boîte de L-Box.

II. 4- 2-7- L'air occlus:

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un béton le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange. Il est possible d'évaluer la quantité d'air enfermée lors de remplissage d'un volume en exploitant un volume de référence cylindrique.

Nous avons utilisé pour cela un aéromètre de huit litres modèle« CONTROLS »
(Fig. II. 21).

On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'un tube dans le premier robinet.

Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0 ٪ On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure II.21. Aéromètre à béton.

II. 4- 2-8- Densité :

La densité des mélanges a été calculée en fonction de l'échantillon introduit dans l'appareil de mesure de l'air occlus. On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre rempli par le mélange, avant la mesure de l'air occlus. Si les poids de la chambre pleine et vide sont respectivement P et P0, la densité du mélange frais est égal à d = P –P0 / 8; 8 étant le volume de la chambre inférieure de l'aéromètre.



Figure II.22. Mesure de la densité du béton.

II. 5- 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. 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.23. Conservation des éprouvettes.

II. 6- Béton durci:

Les essais de caractérisation sur béton durci sont résumes dans le (tableau II.6) suivant :

Tableau II.6. Essais de caractérisation sur bétons durcis :

Mélange	**Nombre d'éprouvette**	**Dimension (cm)**	**Age**	**Types d'essai**
BAPSF BAPFM1 BAPFM2	30	10x10x10	7 et 28 jours	Compression
BAPSF BAPFM1 BAPFM2	30	7x7x28	7 et 28 jours	Traction par flexion
BAPSF BAPFM1 BAPFM2	60	7x7x28	1, 2, 3, 7,14et28 jours	Retrait et Gonflement

II. 6- 1- Essai ultrasonique :

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage (Fig. **II.24**).
Pour chaque éprouvette, les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette on a placé les

deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline (Fig **II.25**), puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé (Fig. **II.26**).



Figure II.24. Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.



Figure II.25. Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline.



Figure II.26. Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.

Le résultat d'essai à l'ultrason correspondant à chaque éprouvette est la valeur médiane de deux mesures effectuées selon les deux sens, et par conséquent la vitesse des ultrasons calculée est exprimée à 0,01 km/s prés, selon la norme NF EN 12504-4 **[40]**, NA 5027 **[41].**

II. 6- 2- Essai scléromètrique:

Il est procédé au relevé 3 mesures sur éprouvettes prismatique 7 x 7 x 28cm avec le respect des distances. Les éprouvettes doivent être maintenues entre les plateaux de la presse sous unecontrainte de 0.5 MPa.

Les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après 48h de la sortie des éprouvettes de leur ambiance de conservation.

L'essai s'effectue avec l'appareil placé en position horizontale et une surface lisse.

Amener la tige au contact du béton et presser l'appareil dans le sens de l'effort exercé. Mesurer le rebondissement de la masselotte en observant la nouvelle position prise par l'index devant l'échelle graduée. Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone.

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations.



Figure II 27. Scléromètre.



Figure II 28. Essais sclérométrique.

Deux méthodes sont utilisées pour l'étalonnage du scléromètre :

- **Sur bloc en néoprène armé :**

Cette méthode consiste à effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et à calculer la moyenne de l'indice sclérométrique lsm de la 2ème série. La position de l'appareil doit être verticale.
Dans le cas où ;28 ≤ lsm ≤ 32 : le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant

lsm < 28 ou lsm > 32 : appareil défectueux
Dans le deuxième cas, il est procédé au nettoyage de l'appareil afin de déterminer
une nouvelle fois la valeur de lsm. Si l'appareil est toujours défectueux, donc il est inutilisable.
Une révision est nécessaire dans ce cas avec un certificat d'étalonnage.

- **Sur éprouvettes de béton :**

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice scléromètrique lsm par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes de béton, correspondant aux trois résistances à la compression 15, 25 et 35 MPa.
La moyenne de l'indice ls est déterminée pour chaque niveau de résistance.
Les mesures de l'indice ls sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes.
Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure II.29.

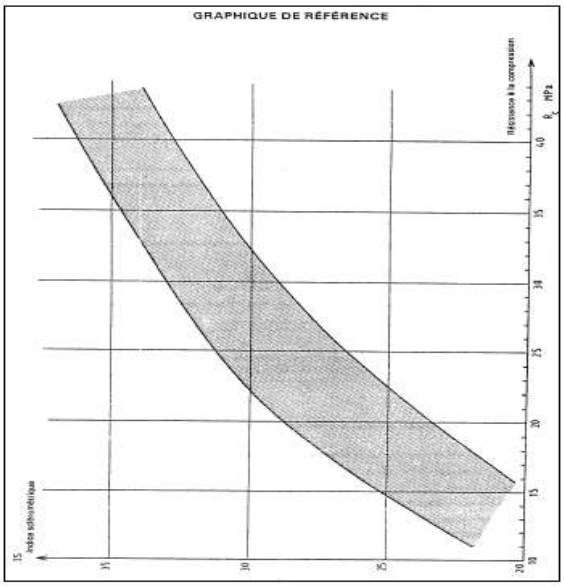


Figure II.29 : Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes.

Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouvent à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant.
Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage.

II. 6- 3- 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, NA 427) ASTM C39/C39M.
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(Fig. **II.30**).



Figure II.30. 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.



L'éprouvette avant l'écrasement.



L'éprouvette après l'écrasement.

Figure II.31. Essai de compression.

II. 6- 4- Résistance à la traction par flexion:

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 7x7x28 cm ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-411 munie d'un banc de flexion 4 points (Fig. **II.30**).
Cet essai est homologué de norme NF P 18-407**, (**NA 428)**,** ASTM C293,
et permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur 4a (7 x 7 x 28). Pour une charge totale P, le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :
M = PL/6 et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est ftj = 0.6M*Y /I



L'éprouvette avant l'essai.



L'éprouvette après l'essai.

Figure II.32. Essai de traction par flexion.

II. 6- 5- Retrait:

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.

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (Fig. II.33) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à tout moment à cours terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C.

II. 6- 6- Gonflement :

La même procédure de mesures sauf que les conservations, des éprouvettes serrées d'au un bag d'eau de température 25 +- 2^{0}C



Figure II.33. 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 (Fig. II.30).



Figure II.34. Etalonnage de l'appareil.

b. Mesure des variations de masse :

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

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).

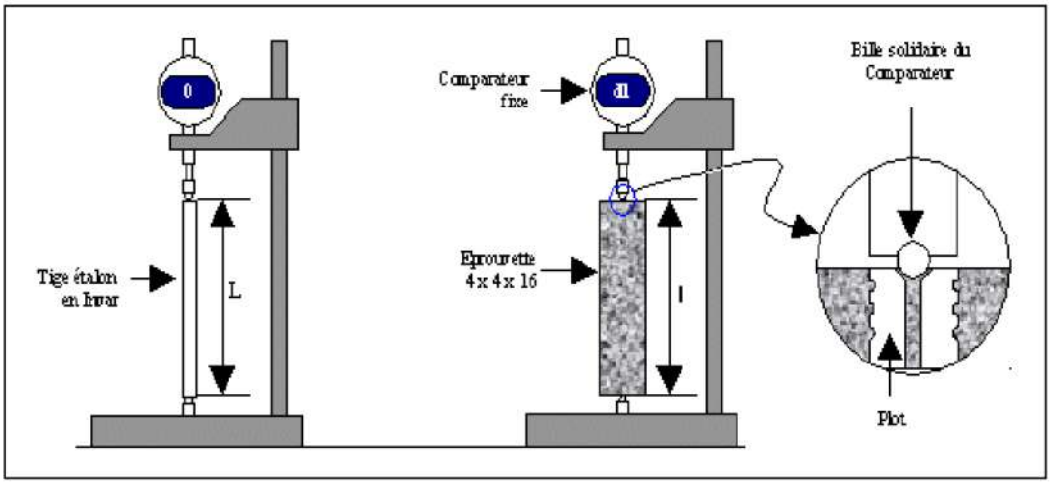


Figure II.35. Appareillage pour la mesure du retrait.

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 (t0) 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. 6- 7- Absorption d'eau :

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.36**), 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) **[47]**.

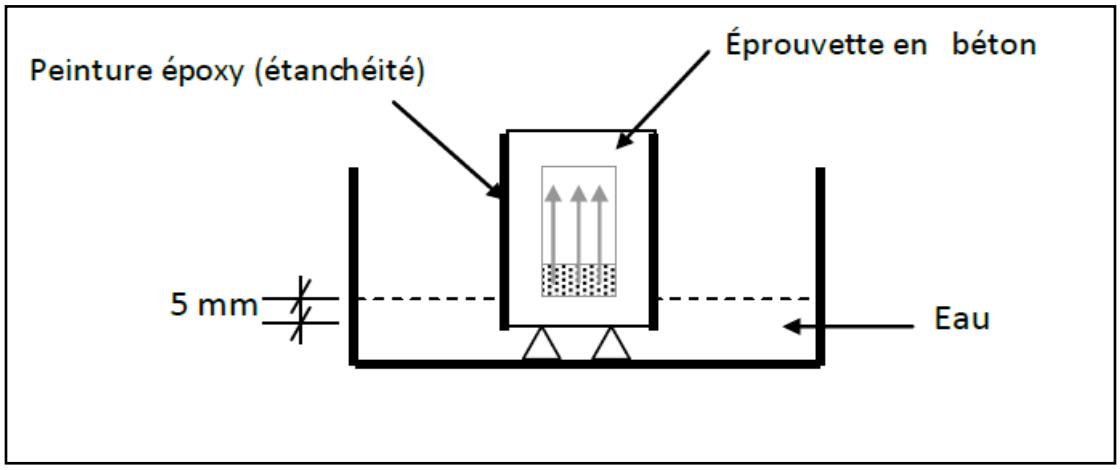


Figure II.36. Absorption d'eau par succion capillaire.

II.7 Conclusion

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché algérien tels que le ciment, les granulats, les superplastifiants).
Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur béton. 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, U-Box, J-Ring). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (compression, traction, ultrasonique, sclérométrique, absorption d'eau, retrait).

Pour détermin2 reconnaitre l'influence des fibres métalliques sur le BAP soit à l'état frés ou l'état durci.

CHAPITRE III:

INTERPRETATION DES RESULTATS

III. 1- Introduction :

Les résultats obtenus suites aux essais entrepris, sont regroupés, selon l'âge, le type d'essai et le type de béton afin de permettre la compréhension et l'exploitation de ces derniers de la manière la plus pratique et la plus aisée.

III. 2- Essais sur un béton à l'état frais :

Les caractéristiques à l'état frais des différents bétons réalisés sont résumées dans le tableau III.1

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

Béton	Étalement		J-Ring			Temps d'écoulement V-funnel (mm)	Hauteur de remplissage (U-Box) (cm)	Stabilité au tamis (%)	L-Box Hauteur H_2/H_1 (mm)	Densité	Air occlus (%)
	Étalement D (mm)	T_{50} (sec)	Étalement D_J (mm)	T_{50} (sec)	Hauteur $H_{ext}-H_{int}$ (mm)						
BAPT	622,5	2,02	614	3,15	9,70	4,02	31	1,78	0,8	2,62	1
BAPM1 0.3%	515	2,49	480	–	10	2,93	18	0,8	0,125	2,38	1,7
BAPM1 0.5%	497,5	3,01	470	–	60	4,41	26	0,6	0,08	2,42	1,4
BAPM2 0.3%	622,5	2,3	530	4,08	10	2,42	22	1,2	0,375	2,31	2,31
BAPM2 0.5%	512,5	2,53	522	6,64	20	3,02	25	1,4	0,226	2,37	2,37
Limites Pour Les BAP	600-850	–	650-850	–	≤10	4-12	≥30	≤15	≈0,9	–	–

III. 2- 1- Effet des fibres métalliques sur la capacité de passage et T_{50} du BAP et la différence des hauteurs (J-Ring) :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

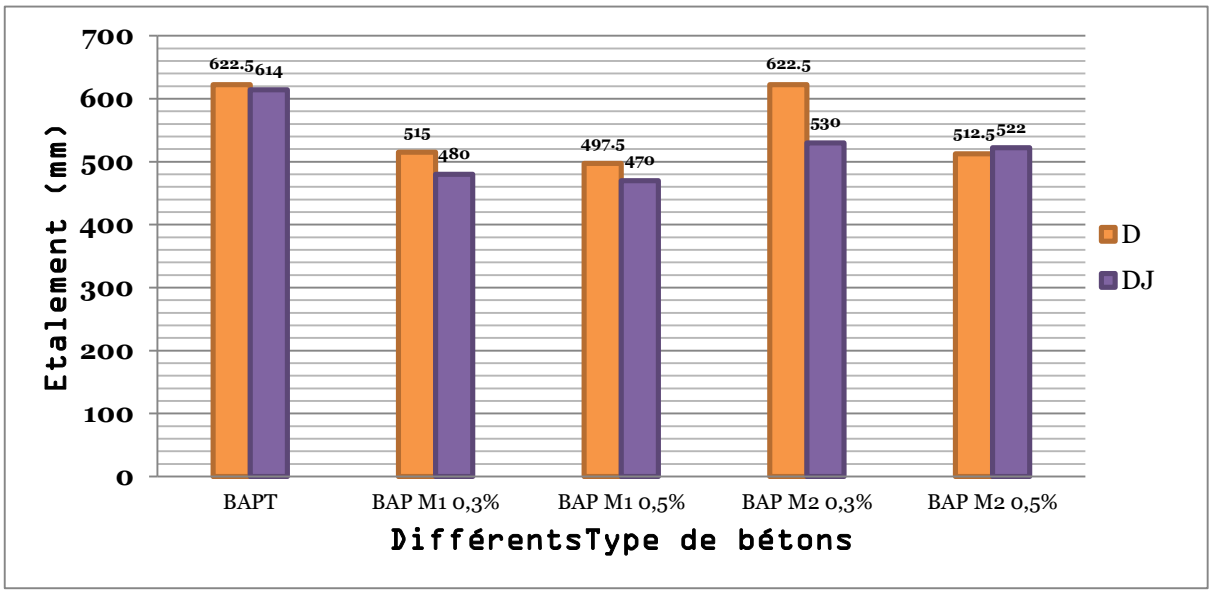


Figure III.1. L'étalement des différents BAP réalisés (sans et avec J-Ring).

D'après le (tableau III.1) et la (figure III.1), on a constaté que l'étalement des bétons autoplaçants renforcé par des fibres métalliques industrielles RC-80/50 (avec ou sans J-Ring) a diminué à cause de l'incorporation des fibres ; plus on augmente le dosage volumique des fibres plus l'étalement diminue. Ceci semble logique parce que les fibres ont perturbé l'écoulement du béton par rapport au BAPT à l'autre façon le béton autoplaçants renforcé par des fibres métalliques FI 50 n'a pas influencé beaucoup sur l'étalement sans J-ring surtouts en pourcentage 0.3%, lorsque on a utilisé le J-Ring l'étalement à diminué d'une façon remarquable à cause d'un blocage des fibres aux droits des armatures de ce dernier.

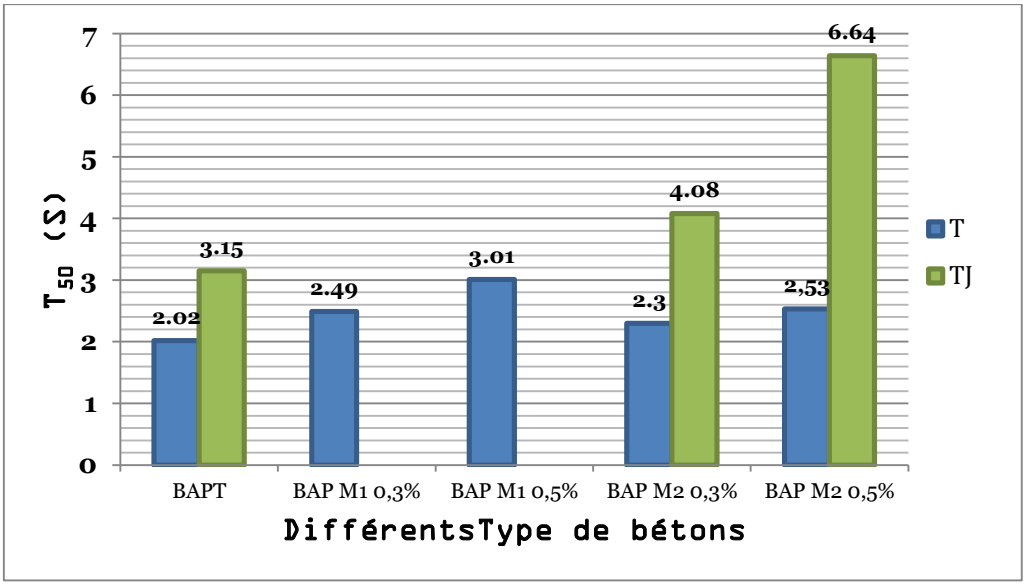


Figure III.2. Temps de passage T_{50} des différents BAP réalisés (sans et avec J-Ring).

La figure ci-dessus montre que le temps de passage T_{50} est augmenté lorsque on a utilisé J-Ring, cela est dû aux croisement des fibres aux droits des armatures, et par conséquence un blocage du béton, donc un temps de passage plus important; aussi on constate que si on augmente le volume des fibres le temps de passage T_{50} avec ou sans J-Ring augmente, on signale que l'étalement le 1er type de béton autoplacant de fibre métalliques(RC 80/50) n'a pas atteint un diamètre de 50 cm lors de l'utilisation du J-Ring .

Donc les fibres métalliques RC-80/50 sont les plus influant sur l'étalement et le T50 sans ou avec J-ring que les fibres FI50.

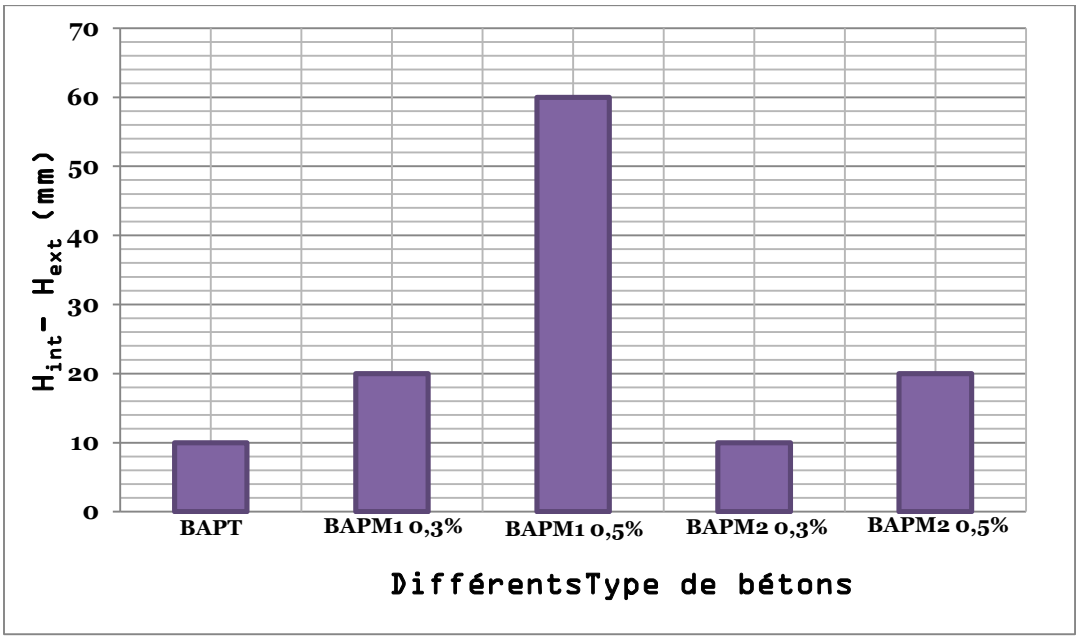


Figure III.3. Différence des hauteurs des différents BAP réalisés à travers (J-Ring).

La figure III.3 montre que la différence de hauteur (H_{ext}-H_{int}) a été affecté par l'incorporation des fibres; plus on augmente le volume des fibres plus la différence des hauteurs augmente ; l'écoulement du béton a été freiné à cause d'un blocage des fibres au droit des armatures du J-Ring, ce qui affecte la capacité de passage du béton.

D'autre part les fibres métalliques ondulées FI50 ont un effet moins important que les fibres RC80/50, cela est éventuellement dû à la forme des fibres, on signale que les BAP fibrés (BAPM2 0,3% et 0,5%) présentent un écoulement comparable à celle du béton autoplaçant témoin, bien sûr avec une certaine diminution.

III. 2- 2- Effet des fibres métalliques sur le temps d'écoulement des BAP à travers V-funnel :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

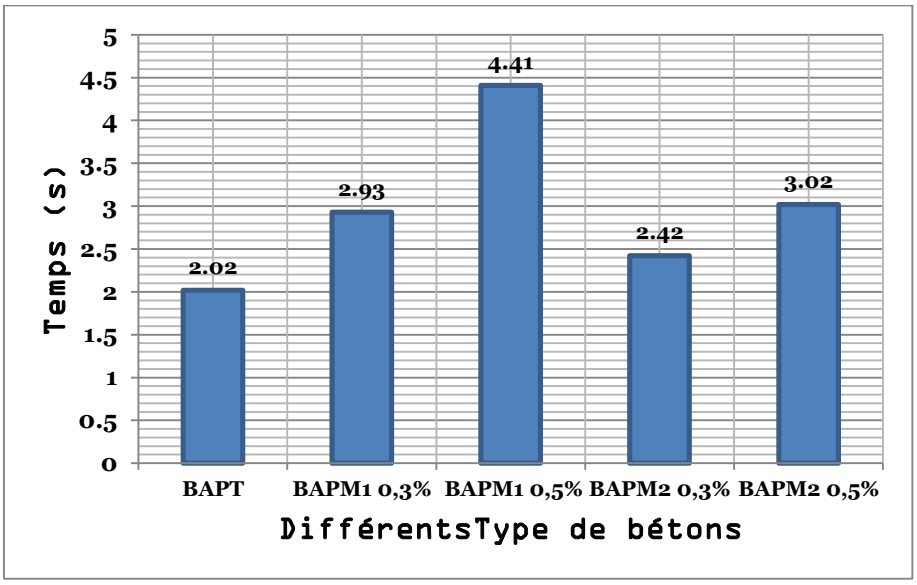


Figure III.4. Temps d'écoulement des différents BAP réalisés à travers (V-Funnel).

D'après la (figure III.4) et le (tableau III.1), on constate que le temps d'écoulement à travers le V-Funnel a été augmenté en fonction de l'augmentation de dosage volumique des fibres par rapport au BAPT. Ceci est dû à la diminution de la viscosité du béton.

Les fibres métalliques RC-80 ont un grand temps d'écoulement à travers le (V-Funnel) que le 2ème type, la forme des fibres est éventuellement la cause.

III. 2- 3- Effet des fibres métallique sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U-Box) :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

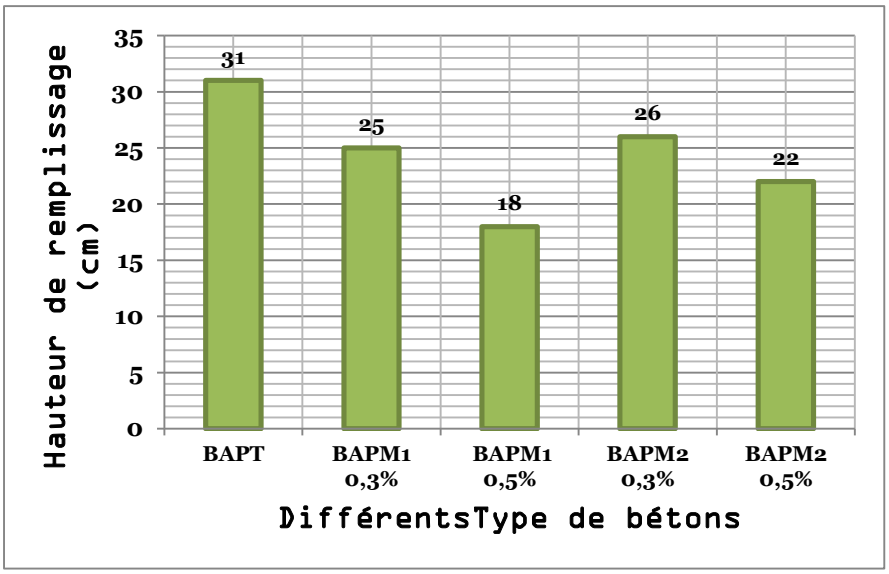


Figure III.5. Hauteur de remplissage des différents BAP réalisés à travers (U-Box).

D'après la figure ci-dessus et le (tableau III.5) on remarque que pour les BAPM plus que le volume des fibres augmente plus la hauteur de remplissage diminue par rapport au BAPT, ceci due au blocage des fibres au droit des armatures du U-Box, ce qui provoque un blocage de passage de béton. Les fibres (FI50) présentent un comportement beaucoup mieux que les fibres (RC80/50).

III. 2- 4- Effet des fibres métallique sur le taux de remplissage des BAP à travers L-BOX :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

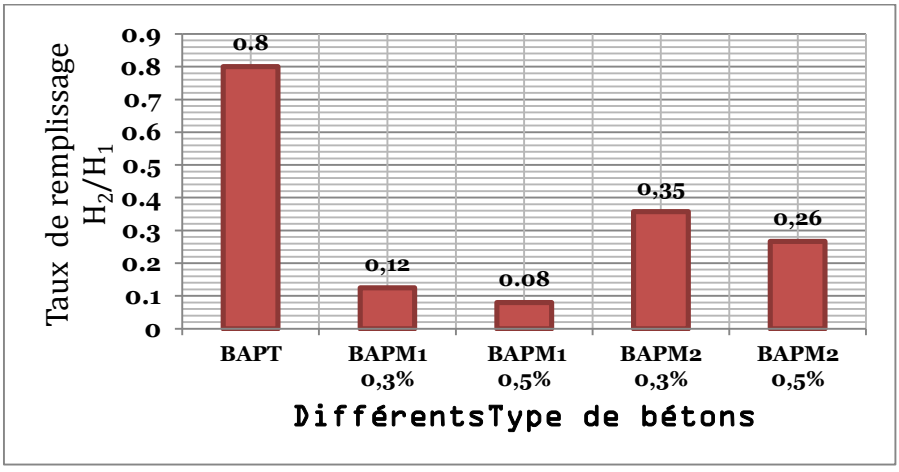


Figure III.6. Taux de remplissage (H_2/H_1) des différents BAP réalisés à travers (L-Box)

D'après la (figure III.6) et le (tableau III.1) on remarque que pour les deux type BAPM plus que le volume des fibres augmente plus la hauteur de remplissage diminue par rapport au BAPT, ceci due au blocage des fibres au droit des armatures du L-Box, ce qui provoque un blocage de passage de béton.

III. 2- 5- Effet des fibres métalliques sur la densité des BAP :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

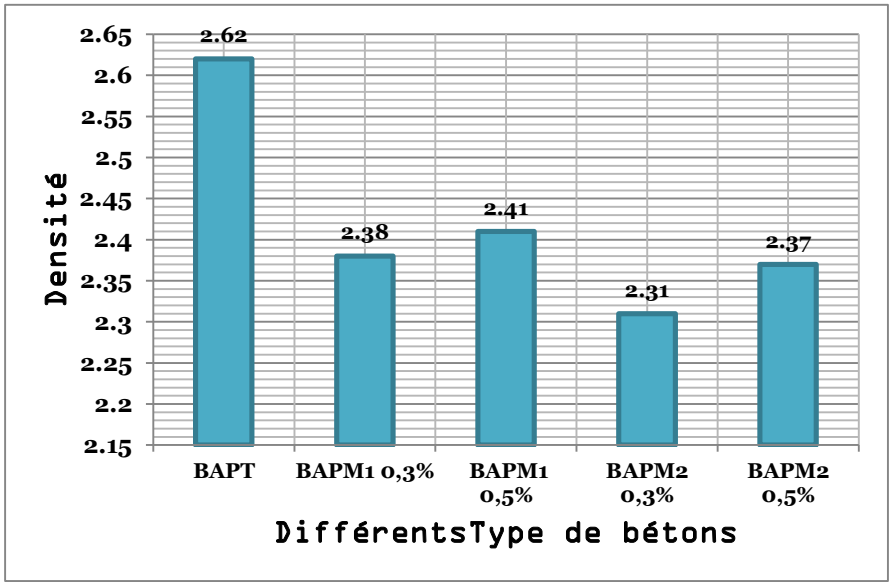


Figure III.7. Densité des différents BAP réalisés.

La substitution d'un volume du béton par un volume des fibres cause une diminution de la densité relative, l'incorporation des fibres provoque un important volume d'air occlus, cela provoque une diminution de la densité, Plus on augmente le volume de fibre, plus la densité augmente toute en restant sous la valeur de la densité du béton autoplaçant témoin, cela est éventuellement dû à l'importante masse volumique des fibres métalliques.

III. 2- 6- Effet des fibres métalliques sur l'air occlus des BAP :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

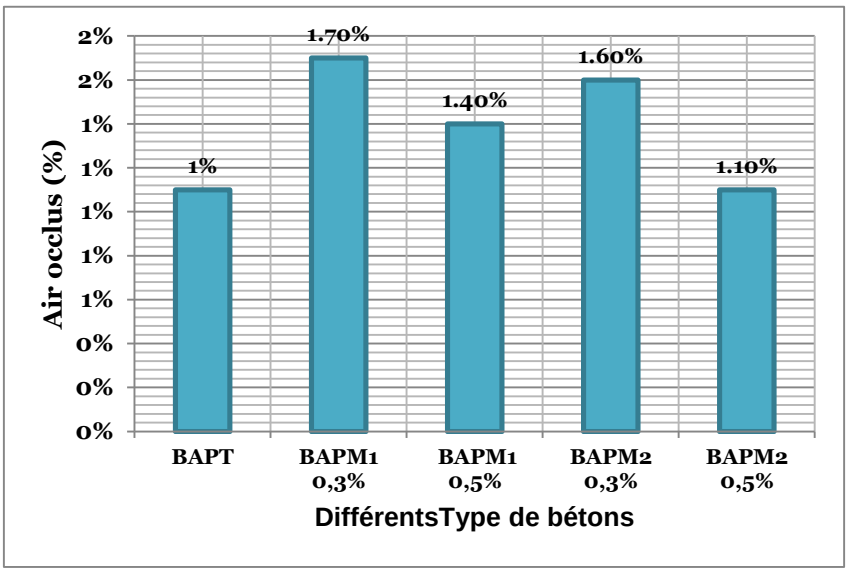


Figure III.8. Air occlus des différents BAP réalisés à partir de l'aéromètre.

L'air occlus est par conséquence affecté par l'incorporation des fibres, on constate que l'incorporation des fibres cause une augmentation de volume d'air occlus, et plus on augmente le volume des fibres plus l'air occlus diminue, toute en restant dans des valeurs supérieurs à celles du BAPT.

Ces résultats sont conforment aux résultats de la densité, si la densité diminue on obtient un volume de vide plus important.

III. 2- 7- Effet des fibres métalliques sur la stabilité au tamis :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

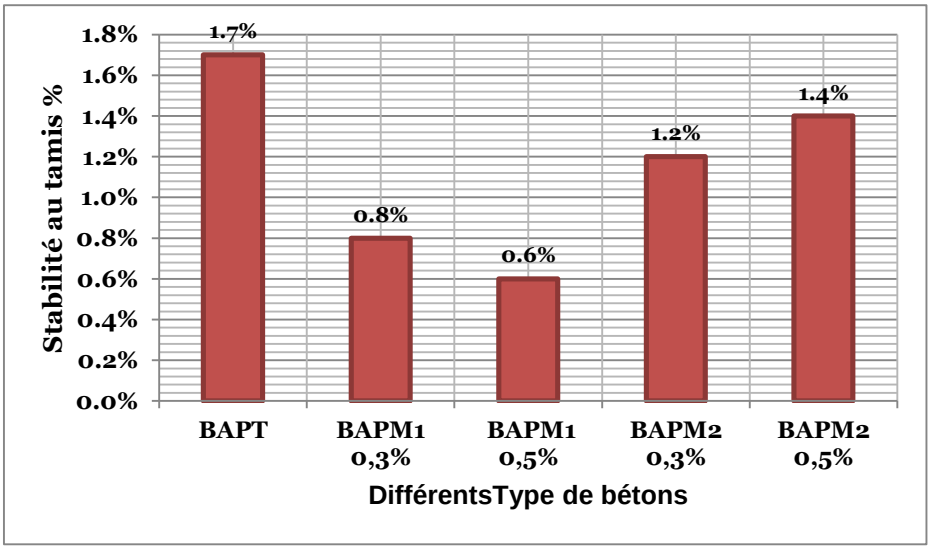


Figure III.9. La stabilité au tamis des différents BAP réalisés.

On constate que la ségrégation est améliorées par l'incorporation des fibres, cela est dû au croisement de ces dernier au niveau des mailles du tamis 5mm, ce qui provoque un diminution de la taille de ces derniers (<5mm), cette action est éventuellement la cause de minimiser la quantité de la laitance passante à travers les mailles du tamis, et par conséquence une diminution du pourcentage.

III. 3- Essais sur un béton durci :

III. 3- 1- Mesure de la résistance on se reposant sur l'essai ultrasonique:

Tableau III.2. Résultats des vitesses ultrasoniques du différents BAP :

Temps (J)	Vitesse ultrasonique des différents BAP (km/s)				
	BAPT	BAPM1 0.3%	BAPM1 0.5%	BAPM2 0.3%	BAPM2 0.5%
7	4.74	4.63	4.67	4.96	5.02
28	5.18	4.77	4.86	5.35	5.38

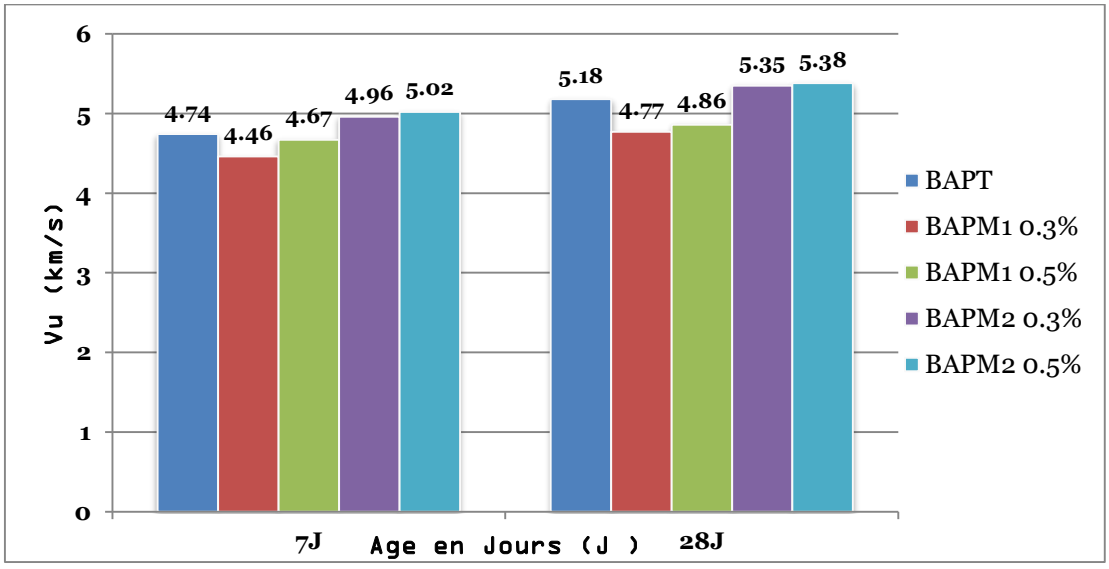


Figure III.10. Vitesse ultrasonique des différents BAP réalisés.

On constate que les vitesses de propagation des ondes ultrasoniques (V_u) sont augmentées en fonction de l'augmentation de volume de fibres, avec l'obtention des valeurs comparable aux résultats des BAPT, Lors de l'utilisation des fibres ondulées on a constaté que les vitesses

de propagations relatives à 28 jours sont plus importantes que les BAPT, en comparant avec les résultats de la résistance à la compression, on trouve qu'il y a une contradiction, cela est dû éventuellement à la forme et l'orientation des fibres à l'intérieur de la matrice du béton.
Si les fibres sont parallèles à la propagation des ondes ultrasonique, on obtient des vitesses plus importantes.

III. 3- 2- Effet des fibres métalliques sur la résistance à la compression du BAP :

Tableau III.3. Résultats de Résistance à la compression et traction du différents BAP :

	BAPT		$BAPM_1$ 0.3%		$BAPM_1$ 0.5%		$BAPM_2$ 0.3%		$BAPM_2$ 0.5%	
Temps (j)	R_c(MPa)	R_t(MPa)	R_c(MPa)	R_t(Mpa)	R_c(Mpa)	R_t(Mpa)	R_c(Mpa)	R_t(Mpa)	R_c(Mpa)	R_t(Mpa)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	44,25	5,21	44,16	5,33	46,12	5,79	45,20	5,38	42,35	5,90
28	58,73	5,9	56,63	6,20	51,90	6,38	55,70	5,7	56,20	6,19

R_c *: Résistance à la compression.*
R_t *: Résistance à la traction.*

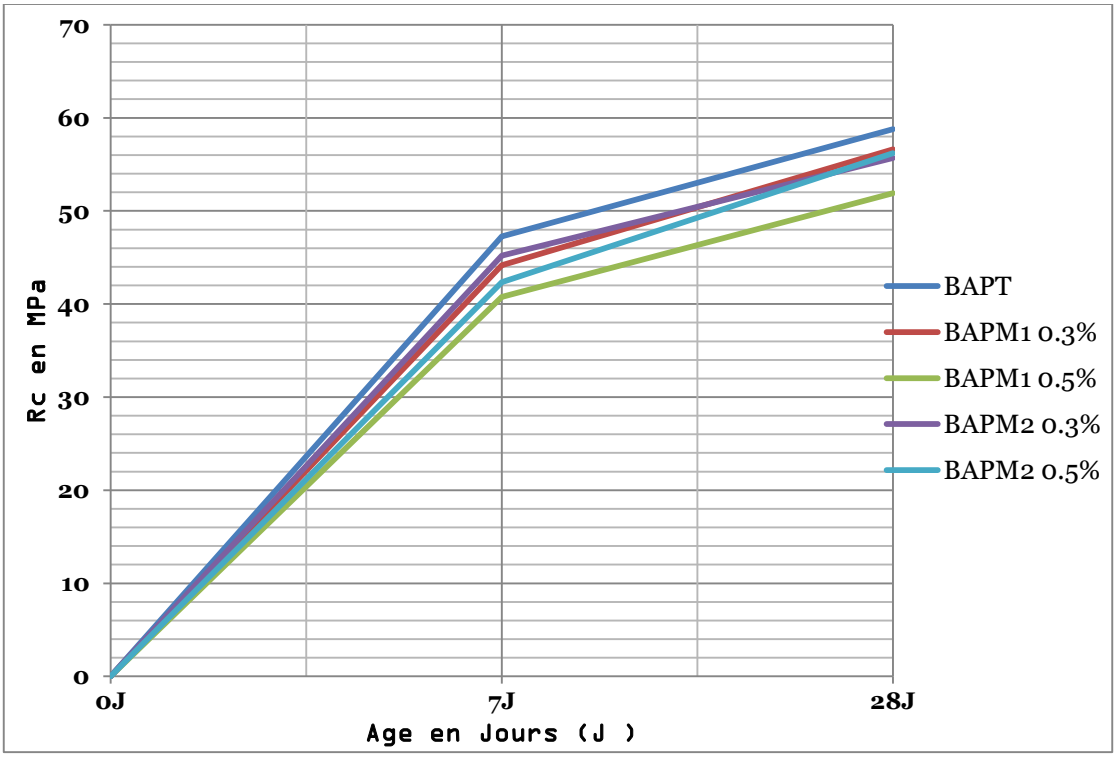


Figure III.11. Résistance à la compression des différents BAP réalisés.

D'après la (figure III.11) et le (tableau III.3), on remarque que la résistance à la compression est aussi affecté par l'introduction des fibres ; plus on augmente le volume des fibres plus la résistance diminue, tout en restant dans la marge des bétons résistants. Les importants volumes de vides à l'intérieur des BAP fibrés peut diminuer la compacité du matériau et par conséquence une légère chute de la résistance à la compression. Ces résultats sont comparables aux résultats d'autres chercheurs.

III. 3- 3- Effet des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion du BAP:

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

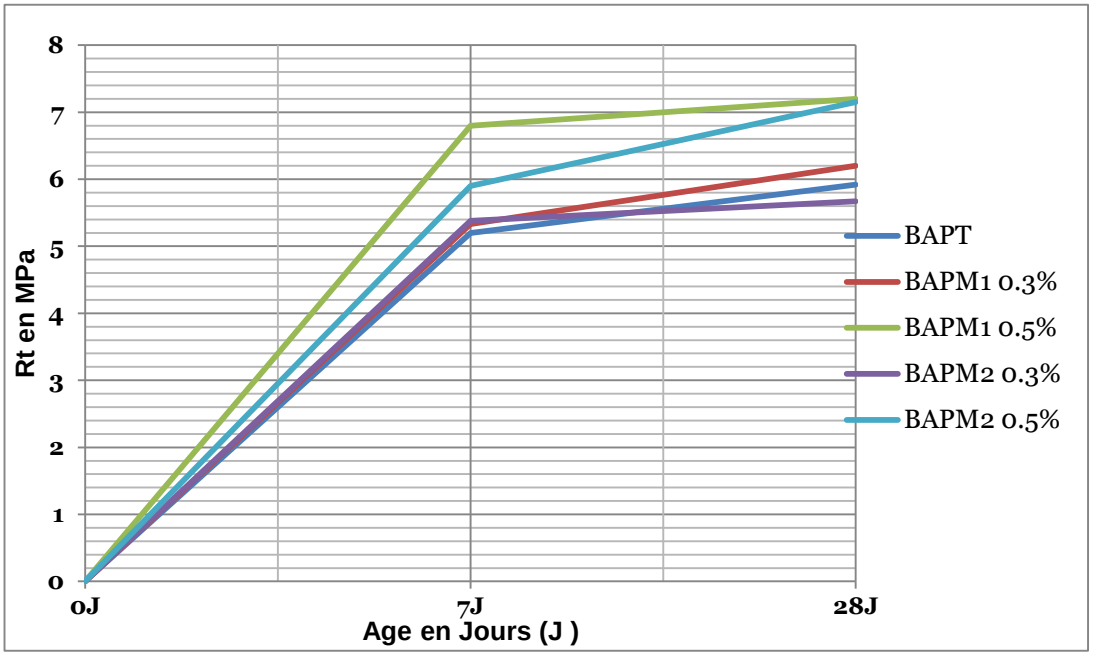


Figure III.12. Résistance à la traction par flexion des différents BAP réalisés.

La résistance à la traction est amélioré par l'incorporation des fibres à différents pourcentage volumique, plus on augmente le volume des fibres, plus la résistance à traction par flexion augmente.

Cela est dû au croisement des fibres à l'intérieur de la matrice du béton ; on a constaté aussi que l'orientation des fibres été dans le sens d'écoulement, cette orientation améliore la résistance à la traction d'une part, et élimine la rupture brusque des éprouvettes.

III. 3- 4- Effet des fibres métalliques sur retrait et gonflement BAP :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

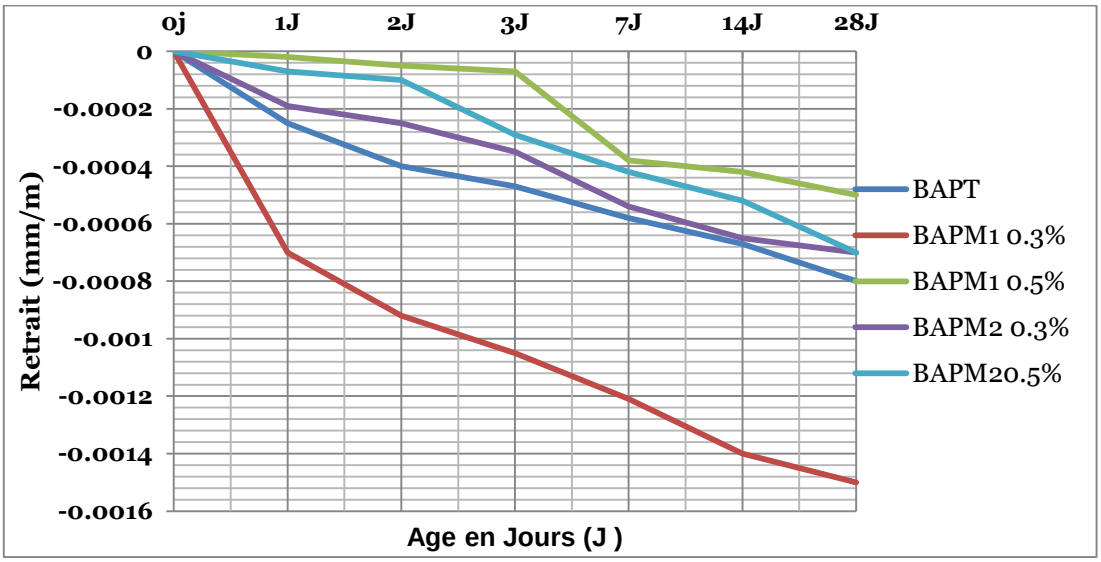


Figure III.13. Retrait des différents BAP réalisés.

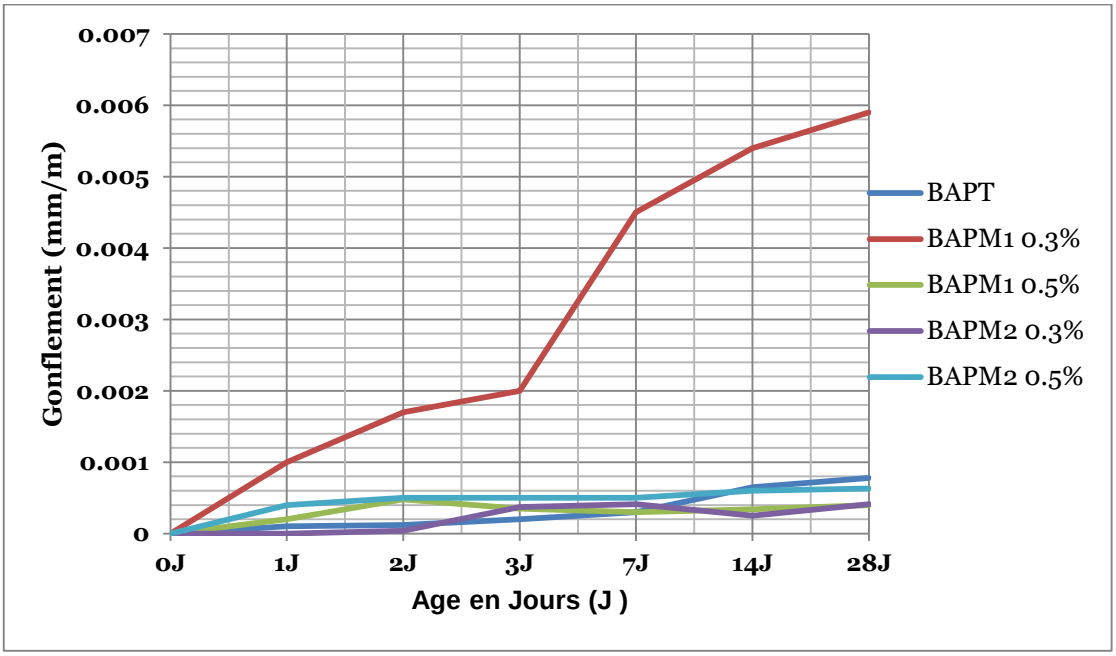


Figure III.14. Gonflement des différents BAP réalisés.

Le retrait est aussi amélioré par l'incorporation des fibres plus on augmente le pourcentage des fibres plus le retrait diminue, cela est dû à la bonne adhérence du couple (matrice-fibre). Cela semble logique car les fibres métalliques s'opposent à la variation dimensionnelle due au séchage du béton.

On a remarqué que seul le béton autoplaçant renforcé de fibres RC80/50 a un retrait très important, cela est dû éventuellement à l'important volume de vide à l'intérieur du béton.

Les résultats du gonflement confirment cette hypothèse, on a obtenu un gonflement comparable à celle du béton autoplaçant témoin, sauf le béton BAPM1 0,3% qu'il a présenté un gonflement très important.

III. 3- 5- Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP :

L'effet des différentes fibres utilisées sur le béton est représenté dans la figure suivante :

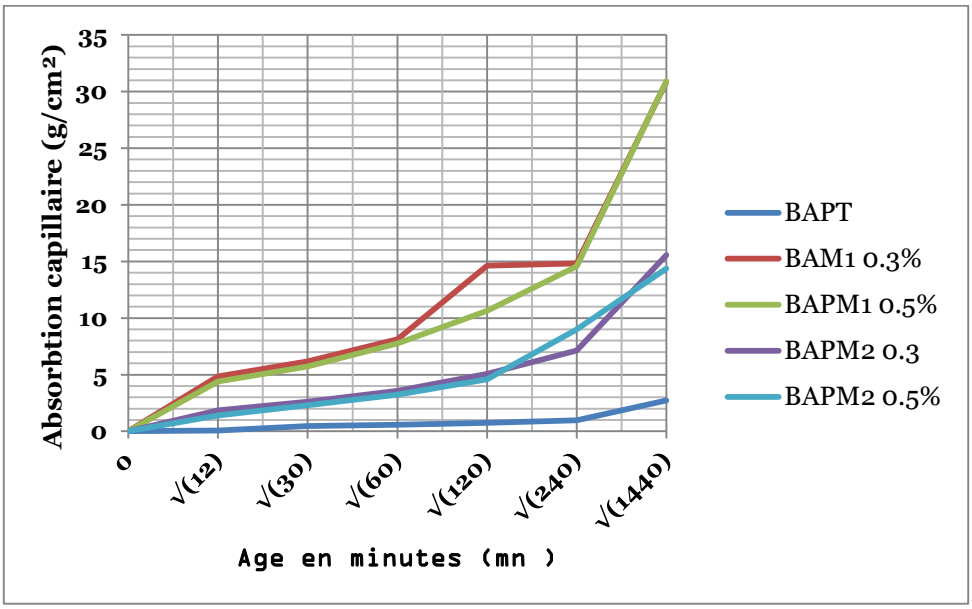


Figure III.15. Absorption d'eau par capillarité des différents BAP réalisés.

L'eau absorbé par capillarité est aussi plus important dans les BAP fibrés, plus on augmente le pourcentage des fibres, plus l'eau absorbée est plus importante. Ce résultat est très logique tout en comparant avec les résultats d'air occlus, la densité, retrait et gonflement, donc plus le matériau est poreux plus l'absorption est plus importante.

III.4 Conclusion

Les nombreuses recherches effectuées pour une bonne mise en œuvre et pour l'utilisation des BAPFM, font apparaître que cet objectif ne peut être atteint qu'en faisant varier les paramètres qui conditionnent les caractéristiques du béton autoplaçant.

L'incorporation dans la composition du béton autoplaçant de fibres métalliques, en forme de ondulée, apporte des améliorations notables dans les caractéristiques du béton autoplaçant. Les performances constatées ont été obtenues sans exiger un choix particulier de ciment, ni des granulats naturels issus de concassage. Les résistances relativement élevées à court terme de ce matériau, laissent entrevoir une éventuelle utilisation de ce type de matériau dans la fabrication d'éléments de faible épaisseur, avec une grande durée de service sans entretien ni réparation.

CONCLUSION GENERALE.

A la lumière des résultats obtenus durant ce travail, on peut conclure que :

- L'ouvrabilité des bétons autoplaçants renforcé par des fibres (métalliques) diminue.
- La densité des différents bétons avec les fibres (métalliques) chute en fonction du pourcentage d'ajouts en fibre.
- Une légère diminution de la résistance à la compression.
- Une augmentation considérable de la résistance à la traction.
- Le retrait est amélioré par l'incorporation des fibres (plus en augmente le pourcentage des fibres plus le retrait diminue)
- Le taux d'absorbation de l'eau par capillarité est important dans les BAP fibrés (plus en augmente le pourcentage des fibres plus la quantité de l'eau absorbé est importante)

RECOMMONDATIONS.

Recommandations :

Dans la continuité de ce projet, un travail consistant reste à mener a savoir:

1) Utilisation d'autre type des fibres métalliques.
2) Recyclage des déchets métalliques dans ces BAP.
3) Diminution de la langueur des fibres métallique.
4) Essai d'autres formes des fibres (hélices).

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.

Références Bibliographiques :

[1]BERBAOUI.R: « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires a base polymère. » Soutenue le 21 janvier 2010 à l'université de Cergy Pontoise. Spécialité génie mécanique.
[2] BARON. J et OLLIVIER.J : « Les bétons : bases et données pour leur formulation » Edition Eyrolles. 1999
[3] OLLIVIER. J.P et VICHOT A. pour l'ATILH : « La durabilité du béton.»- Presses de l'école des Ponts et Chaussées - Paris - 2008.
[4] Collection CIM béton .Fiches techniques. Tome 1 : 71 pages. Réf. G10. Editeur Cimbéton. Septembre 2005.
[5] DREUX G., FESTA J. : 1995, "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.
[6] Contexte normatif des bétons : Mise en page et réalisation : Amprincipe Paris (édition septembre 2005)
[7] DREUX. G 1979 : « Nouveau guide du béton. »
[8] GABRYSIA. F: Matériaux. (Chapitre 2 les granulats et chapitre 4 bétons). 2007
[9] ADAMM.N : « Propriétés des bétons. »Edition Eyrolles. 2000
[10] VENANT.M : « Ciment et bétons. » 2ème édition. 1973
[11] Groupe Eyrolles : « Cône d'Abrams. » Edition Eyrolles.2010
[12] EN-12350-6 : masse volumique du béton frais.
[13] EN-12390-3 : résistance à la compression des éprouvettes.
[14] EN-12390-5 : résistance à la flexion sur éprouvettes.
[15] THIBAULT. B, BOUFFARD.M, HORLAIT.C, LACROIX.R : Projet IFIPS(2008)
[16] DONGMO.E et BERTHE.J : « Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses. » Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005 [17/01/2006]
[17]BRUNO.S : « Etude des mouvements d'eau dans les matériaux poreux appliquée à la résistance au gel et au comportement des crépis sur la maçonnerie. » Thèse No 848 (1990). Département des matériaux. Ecole Polytechnique Fédérale de LAUSANNE pour l'obtention du grade de docteur es sciences techniques.
[18]Fascicule de documentation de FD P 18-542 : « Granulats - Critères de qualification des granulats naturels pour béton hydraulique vis-à-vis de l'alcali-réaction. » Février 2004.
[19] GUIDE METHODOLOGIQUE : Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne, LCPC (2003).
[20] GSM. ITALCEMENTI Group : Aide- mémoire qualité des granulats. 05/2009. www .gsm-granulats.fr
[21] Norme NA 2608- 1992. Granulats - Mesure du coefficient de fiabilité des sables.
[22] GHOMARI. F., BENDI – OUIS A : « Sciences des matériaux. » Université Aboubekr Belkaid. Département de génie civil.
[23]LIBRAIRIE TECHNIQUE TECHNOSCIENCES : « Granulats sols ciments bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 03 / 2009. 344 pages.

[24]BENKECHKACHE Ghofrane Etude de comportement diffère des bétons autoplaçants Influence des paramétres de composition et de chargement thèse de magister novembre 2007 université Mentouri Constantine.
[25]Okamura H, K OZAWA and M .ouchi<< self-compacting concrete.structural concrete>>MARSH-2000
[26] Association française de génie civil<<béton autoplacant –recommandation provisoire>>, annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000
[27]SEDRAN.T. rhéologies et rhéométrie des bétons. Application au béton autonivelant Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, 1999
[28]Maher el barrak contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil Université Toulouse III – Paul Sabatier
Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA/UPS – génie civil Soutenue le 12 juillet 2005
[29]Baron J., Ollivier J.P., "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.
[30] Larrard F., "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000
[31]Lange F., Mörte H., Rudert V., "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties", Cement and Concrete Research, 27, 10, pp. 1481-1488, 1997.
[32]Zhang X., Han J., "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cément paste", Cement and Concrete Research, 30, 5, pp. 827-830, 2000.
[33] Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", Cement and concrete Research, 35, 3, pp. 532 -539, 2005.
[34] Mouhamed irssel khalifa effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilite des bétons autoplaçants thèse de doctorat de l'université de Constantine soutenue le 20 juin 2009
[35]François Perche adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments thèse de doctorat école polytechnique fédérale de Lausanne.
[36]PHAN Trung Hieu <Rhéologie et Stabilité des pâtes de ciments utilisées dans la formulation des Bétons Fluides>. thèse de doctorant l'école normale supérieure de cachan 25/12/06
[37]Flatt R. J., Martys N. S., Bergström L. (2004) : La Rhéologie des Matériaux Cimentaires (The Rheology of Cementitious Materials). National Institute of Standards and Technology. Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, Nº 867, pp. 48-55, Juin-Juillet
[38]JOLICOEUR C., SIMARD M.A. : Chemical admixture -cement interactions : Phenomenology and physico-chemical concepts. Cement and Concrete Composite, Vol. 20, No. 2-3, pp. 87-101, 1998
[39]JOLICOEUR C., NKINAMUBANZI P.-C., SIMARD M.-A., PIOTTE, M.: Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete. Proceedings of 4th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI SP-148, pp. 63-88, 1994

[40]FLATT R.J., HOUST Y.F.: A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 8, pp. 1169 -1176, 2001.
[41]TATTERSALL G.H., BANFILL P.F.G. : The rheology of fresh concrete. Pitman Publishing Inc., Londres, Royaume-Uni, 356 pages, 1983
[42]. KREIJGER P.C.: Plasticizers and dispersing admixtures. International congress on admixtures, Londres, Royaume-Uni, 1980
[43]. TADMOR, R.; HERNAÁNDEZ-ZAPATA, E.; CHEN, N.; PINCUS, P.; ISRAELACHVILI, J. N. : Debye lengt h and double-layer forces in polyelectrolyte solutions. Macromolecules, Vol. 35, No. 6, pp. 2380-2388, 2002.
[44]. STANKOVICH, J.; CARNIE, S. L., Electrical Double Layer Interaction between Dissimilar Spherical Colloidal Particles and between a Sphere and a Plate: Nonlinear Poisson-Boltzmann Theory. Langmuir, Vol. 12, No. 6, pp. 1453-1461, 1996.
[45]. GOUY, G. J. : Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. Journal de Physique, Vol. 9, pp. 457-468, 1910.
[46]. CHAPMAN D. L.: A contribution to the theory of electrocapillarity. Philosophical Magazine, Vol. 25, pp. 475-481, 1913
[47]. SALMANG H., SCHOLZE H.: Keramik. 3ème édition, Springer -Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
[48]. NAWA T., EGUCHI H.: Effect of cement characteristics on the fluidity of cement paste containing an organic admixture". Proceeding of the 9th International Congress on Cement Chemistry, New Dehli, Inde, Vol. 4, pp. 579-603, 1992.
[**49] YOSHIOKA K., TAZAWA E.-I., KAWAI K., ENOHATA T.:** Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 10, pp. 1507-1513, 2002
[50] HIRSCH C.M. : Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fliessmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation. Thèse de Doctorat, Technischen Universität, München, 2005
[51] UCHIKAWA H., UCHIDA S., OGAWA K., HANEHARA S.: Influence of CaSO4.2H2O, CaSO4.1/2H2O and CaSO4 on the initial hydration of clinker having different burning degree. Cement and Concrete Research, Vol. 14, No. 5, pp. 645-656, 1984.
[52] BLASK O. : Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen. Thèse de Doctorat, Universität Gesamthochschule Siegen, 2002.
[53]SAKAI E., DAIMON M.: Dispersion mechanisms of alite stabilized by superplasticizers containing polyethylene oxide graft chains. Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference, Roma. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, pp. 187-201, 1997
[54] YOSHIOKA K., SAKAI E., DAIMON M., KITAHARA A.: Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. Journal of the American Ceramic Society, Vol. 80, No. 10, pp. 2667-2671, 1997
[55] RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR C., SPIRATOS N. : Superplasticizers : properties and applications in concrete. CANMET, 404 pages, 1998.

[56] GRIESSER A. : Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures.

Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems. Thèse de Doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2002.
[57]YAMADA K., OGAWA S., HANEHARA S.: Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration inaqueous phase Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 3, pp. 375-383, 2001.
[58]PLANK, J.; SCHWERD, R.; VLAD, D.; BRANDL, A.; CHATZIAGORASTOU, P., Kolloidchemische Aspekte zur Verflüssigung von Zementleimen mit Polycarboxylaten, GDCh-Monographie, Vol. 31, pp. 58 -69, 2004.
[59]PLANK, J., Current Developments on Concrete Admixtures in Europe Proceeding of the Symposium on Chemical Admixtures in Concrete, Dalian, Chine, pp. 13-27, 2004.
[60]RICKERT J. : Wechselwirkungen zwischen Zementen und Betonzusatzmitteln. Technisch-wissenschaftliche Zementtagung, Nuremberg, Allemagne, 2005.
[61]BAALBAKI Moussa thèse doctorat, influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés de bétons « importance de mode d'introduction des adjuvants », université de Sherbrooke, Mas 1998.
[62] Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N., «Superplasticizers : Properties and Applications in Concrete», Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 1998.
[63]Stéphan Assié <<durabilité des bétons autoplaçants>> thèse de doctorat l'institut national des sciences appliquées de Toulouse soutenue le 29 octobre 2004.

[64]OKAMURA H. and OUCHI M., "Self-compacting concrete. Development, present and future", Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999.
[65]HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K., "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan||, Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.
[66]NAGATAKI S. and FUJIWARA H., "Self compacting property of highly flowable concrete", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, 1995
[67]PETERSSON Ö., BILLBERG P. and VAN B.K., "A model for Self-Compacting Concrete", International Rilem Conference on _Production methods and workability of concrete', RILEM Proceedings 32, 1996.
[68]SEDRAN T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
[69]CUSSIGH François article Ingénieur Vinci Construction France. 11 - 2007
[70]Hasni, « Bétons Autoplaçants », rapport de recherche N° 98-004/98-006, Fédération Française du Bâtiment 1999.
[71]Bensebti salah eddine formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux thèse doctorat de université Mentouri-Constantine Soutenue le 02 Juillet 2008

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

[73]Jie shen, ismail yurtdas*, cheikhna diagana & alex li une nouvelle méthode de formulation des bétons autoplaçants (bap).
Laboratoire de génie civil, grespi, Université de Reims champagne Ardenne, UFR Sciences, Moulin de la Housse, 51687 Reims Cedex 2- XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4 au 6 juin 2008
[74]YAMMINE Joumana Rapport annuel 2005 - Etat d'avancement de la thèse
[75] 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
[76] GUILLAUME CAMPS Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton these doctorat de l'université de Toulouse soutenue le 10 Septembre 2008.
[77]Rossi P Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p. . (1998)

[78]Chanvillard G. (1993) Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du Comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, OA12.
[79]BENTALHA Néemalou Malika influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice caractérisation - comportement monotone – microstructure cimentaire thèse de doctorat d'etat universite mentouri-constantine 30 OCTOBRE 2007
[80]DE LARRARD F . et LE ROY R <<Reletion entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons a hautes performances>> matériaux et construction 25, pp.464 - 475,1992
[81]Youcef FRITIH Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé thèse de doctorat de l'université de Toulouse 08 Juillet 2009.
[82]Casanova P., « Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure », LCPC. (1996)
[83]Sukontasukkul P., (2004) "Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending", Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep. 2004) pp. 35-41.
[84]Cotterell B., ai Y.W., (1996) "Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie Academic & Professional", London/Chapman and Hall. p. 294.
[85]Banthia N., Trottier J (1994): "Concrete reinforced with deformed steel fibers, part I: bondslip mechanisms" ACI Materials Journal, V.91, No.5, pp. 435-444.
[86]Deng Z., Li J., (2007) "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete"Computers and Concrete, Vol. 4, No.1, 19-31.
[87]Li Z., Li F., Chang T-Y.P., Mai Y-W., (1998) "Uniaxial tensil behavior of concrete reinforced with randomly distributed short fibers". ACI Materials J ournal, V.95, No.5, pp. 564-573
[88]Shah P.S., (1991) "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?" ACI Materials Journal, V.88, No.6, pp. 595-602.
[**89]Cusens A.R., (1956)** "The measurement of the workability of dry concrete mixes", Magazine of Concrete Research, Vol 8, N° 22, pp 23-30.

[90]Yun H.D., Yang I.S., Kim S.W., Jeon E., Choi C.S., Fukuyama H (2007) "Mechanical properties of high-performance hybrid-fibre-reinforced cementitious composites (HPHFRCCs)" Magazine of Concrete Research, 59, No. 4, May 2007, pp.257–271.
[91]Markovic I., Walraven J.C., Van Mier J.G.M., (2003) "Self-compacting hybrid-fibre concretemix design", workability and mechanical properties, 3 rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
[92]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
[93]Rossi P., (1991) « Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques », Annales de l'ITBTP, N° 492, série béton 279, 1991, pp.90-107.
[94]Rachid berbaoui (identification et analyse de l'endommagement par fatigue des materiaux granulaires a base polymere) thèse de doctorat de l'université du maine Soutenue le 21 janvier 2010
[95]Bernard O., 2000. "Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents." Thèse de Doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse
[96]Löfgren I., (2005) "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.
[97] Di Benedetto H., Ashayer Soltani M.A., 1995. "Etude de la fatigue des mélanges bitumineux." 2ème réunion du réseau de laboratoires Géomatériaux, Environnement, Ouvrage, Aussois France, pp 1-3.
[98]Markovic I., Walraven J.C., Van Mier J.G.M., (2003) "Self-compacting hybrid-fibre concretemix design||, workability and mechanical properties, 3 rd International Symposium on Self -Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
[99]R. Narayanan et A.S. Kareem-Palanjian : Factors inuencing the workability of steel- bre reinforced concrete - parti. Concrete, (45-48), 1982.
[100]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
[101]Grunewald S., (2004) "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete||, Diplom-Ingenieur Delft University of Technology
Grunewald S., Walraven J.C., (2001) —Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete||, Cement and Concrete Research vol.31, pp. 1793-1798
Grunewald S., Walraven J.C., (2001) —Maximum content of steel fibres in self-compacting concrete||, proceeding of the Second International Symposium on Self -Compacting Concrete.
Grunewald S., Walraven J.C., (2003) —Rheological measurements on Self-Compacting fibre reinforced concrete||, 3 rd International Symposium on Self -Compacting Concrete, 17-20 August
2003, Reykjavik, Iceland.

Grunewald S., Walraven J.C., (2001) —Rheological Study on the Workability of Fiber-Reinforced Mortar,‖ Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, K. Ozawa and M. Ouchi, eds., University of Tokyo, Japan, 2001, pp. 127-136.
Grunewald S., Walraven J.C., (2003) —Optimisation of the mixture composition of Self - Compacting fibre reinforced concrete‖, 4 th International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2005, Chicago, USA.
[102]Grunewald S., Walraven J.C., (2001) —Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete‖, Cement and Concrete Research vol.31, pp. 1793-1798
[103]Groth P., (2000b) —Steel Fibre Reinforced SCC, Final report of task 6‖, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc.
[104]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
[105]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.
[106]R.N. Swamy et P.S. Mangat : Inuence of _bre-aggregate interaction on some properties of steel bre reinforced concrete. Materials and Structures, 7(41):307{314, 1974.
[107]S. Gr•unewald : Performance-based design of self-compacting bre reinforced concrete. These de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2004
[108]A.G. Kooiman : Modelling steel _ber reinforced concrete for structural design. Thèse de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2000.
[109]I.Markovic : High-performance hybrid-_bre concrete : development and utilisation. Thèse de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2006
[110]V. K. Bui, M.R. Geiker et S.P. Shah : Rheology of _ber-reinforced cementitious materials.
Michigan, 2003. 4th Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), RILEM publications.
[111]B.P. Hughes et N.I. Fattuhi : The workability of steel-_ber reinforced concrete. Magazine of
Concrete Research, 28(9):157{161, 1976}.
[112]C.D. Johnston : Proportioning, mixing and placement of _ber-reinforced cements and concretes. In D.J. Cleland (Eds.) in P.J.M. Bartos, D.L. Marrs, _editeur : ProductionMethods and Workability of Concrete, pages 155{179. RILEM Symposium, E and FN Spon, London, 1996
[113]R. Narayanan et A.S. Kareem-Palanjian : Factors inuencing the workability of steel-_bre reinforced concrete - partii. Concrete, (42-44), 1983.
[114] M.Z. Bayasi et P. Soroushian : E_ect of steel _ber reinforcement of fresh mix properties of concrete. ACI Material Journal, 89(4):369{374, 1992}.

[115]Alcantara M., Béton auto-plaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique, Thèse doctorat LMDC. (2004)
[116]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.
[117]Granju J-L., Sabathier V., Alcantara M., Pons G., Mouret M., ―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. (2004)
[118]Pons G., Mouret M., Alcantara M., Granju J.L., ―Mechanical behaviour of selfcompacting concrete with hybrid fibre reinforcement‖, Materials and structures, vol. 40, no2, pp. 201-210. (2007)
[119]Houari H. « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenus et cycliques ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon 1993, 244p.

ANNEXES.

La fiche Technique du Ciment.

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE
Réf : DC/FT MT. v03

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 de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons 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 .etc.) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement,. .etc.) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale
33, Rue des Pins. Hydra. Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)
Usine Oggaz (CiBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE لافارج

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



FICHE TECHNIQUE
Réf : DC/FT MT. v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques	
Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO3 (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%) :	0,3 – 0,75
Composition hypothétique du clinker (Bogue)	
Silicates tricalciques C3S (%) :	58 - 64
Silicates bicalciques C2S (%) :	12 - 18
Aluminates tricalciques C3A (%) :	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C4AF (%) :	10,00 – 12,00
Propriétés physiques	
Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231) :	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5
Temps de prise à 20°C (NA 230)	
Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290
Résistance à la compression (NA 234)	
02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)
Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale
33, Rue des Pins. Hydra. Alger
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)
Usine Oggaz (CiBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE لافارج

La fiche technique du superplastifiant.

NOTICE TECHNIQUE — *Edition Juillet 2007* — 2 1 1 9

MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2

Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.
Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

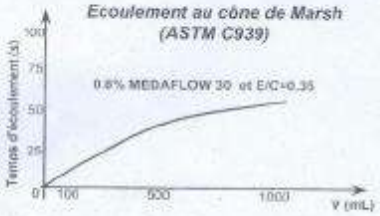
CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Jaunâtre
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité ..... 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore ..... < 1g/L
- Extrait sec 30%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :
Sur béton frais :
- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Ecoulement au cône de Marsh (ASTM C939)



Sur béton durci :
- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2.0 % du poids de ciment soit 0.5 à1.850 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 30** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Les renseignements donnés dans cette notice 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.

60

Granitex
غرانيتكس

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

MEDAFLOW 30

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, et en fûts de 210 Kg et 240 Kg.

Délai de conservation :
Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.
Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : **www.granitex.dz**

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

Les renseignements donnés dans cette notice 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

EXEMPLE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON

Les mêmes démarches de la composition du mortier sont suivies pour la composition du béton autoplaçant

LES DONNEES

- Pour un volume de béton de V=20litres (par exemple)
- **<u>Masses volumiques</u>**
  - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : ρ_G =1426kg/m^3
  - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : ρ_{AG} = 2560kg/m^3
  - Masse volumique absolue du sable : ρ_S = 2630kg/m^3
  - Masse volumique absolue du ciment : ρ_C =3150kg/m^3

- **<u>Coefficients d'absorption</u>**

- Coefficient d'absorption du sable : A_{bS} = 1.2
- Coefficient d'absorption du sable : A_{bG} = 2.18

- Le rapport Sable/Mortier : S/M = 0.40
- 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}=1.419 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volum} / \rho_A = 0.45$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) : $\%Sp$= 1% du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau)

CALCUL D'HUMIDITE

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 : $$\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$$

CALCUL DES DIFFERENTS COMPOSANTS

1- Gravier

La quantité $\boldsymbol{G}$ en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

2- Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton ($\boldsymbol{\%G}$), le pourcentage du mortier par rapport au béton ($\boldsymbol{\%M}$) puis le pourcentage du sable dans le béton ($\boldsymbol{\%S}$) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton ($\boldsymbol{S}$) :

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

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 :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

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 superplatifiant ***Sp*** en (*kg*) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

5- Eau :

L'eau ajoutée au béton (***E***) est divisée en deux partie : la première partie (***E₁***) est de 70% de (***E***) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (***E₂***), 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 contenu 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 contenu dans le superplastifiant : 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 *V*de béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

Eau1 $E_1(kg) = 0.70 \times E$

Eau2 $E_2(kg) = 0.30 \times E$

Fiche technique des fibres RC/80 :



Fibres industrielles RC-80/50.

Nature :	*d'acier tréfilé sans revêtement.*
Longueur :	*50 mm.*
Diamètre :	*0,62 mm.*
Elancement :	*81.*
Nombre de fibres :	*8168 fibres/kg*
Résistance en traction :	*1100 MPa (sur fil).*
Longueur réseau :	*4084 m pour 10kg/m^3 de fibres.*

Fiche technique des fibres industrielles FI50 :



Fibres industrielles FI50.

provenance	MEDAFAC
forme	Bâtonnets ondulés
longueur	50 mm
épaisseur	0.6 + 0.09 mm
Composition chimique Carbone Manganèse Silice Phosphore Souffre	 0.08 – 0.12 % 0.8 – 1 % 0.06% 0.06 – 0.08 % 00
Allongement à la rupture	3 à 4%

L'état frais.

Malaxage du BAP :



Essais étalement :



Essai de J-ring :



Essai V-funnel :





Essai de U-box :






Essai de L-Box :





Essai de stabilité au tamis :





Essais la densité :



Essais de l'air occlus :



L'état durci.

Essai ultrasonique :






Essai scléromètre :




Résistance à la compression :




Essai de traction par flexion :





Retrait et gonflement :





Absorption d'eau :



