**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Dr. YAHIA Farés De Médéa**

**Faculté des Sciences et de La Technologie**

**Département du Génie de la matière**

**Filière Génie Civil**

**Projet de Fin d'Etudes**

## Pour l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Option : Construction et Matériaux

# THEME

# RENFORCEMENT DU BÉTON AUTOPLAÇANT (BAP) PAR DES FIBRES VÉGÉTALES

**Réalisé par**

Melle. BENYAHIA Fella

Mr. BENAISSA Youcef

**Encadré par**

Dr. DEBIEB Farid

**Co-encadré par**

Mr. IRKI Ilyes

**PROMOTION: JUIN 2013**

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer mes profondes gratitudes à notre promoteur Dr. Debieb Farid et à Mr IRKI Ilyes pour l'encadrement de ce mémoire, pour tenir le bon chemin dans le domaine de recherche, pour leurs aides, leurs patiences et la confiance qu'ils nous ont accordé.*

*Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury pour avoir accepter de juger notre travail.*

***Nos** sincères remerciements vont également à touts les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa.*

***Nous** remercions également Melle. Boukhelkhal .Dj et SETTARI Chafika pour les diverses discussions et conseils enrichissants, qui ont aussi suivi notre travaux et nous ont fait découvrir la vie de la recherche, au cours de ce projet.*

*Encore des remerciements à toutes les personnes du laboratoire "HALL technologie" pour leurs aides durant toute la période expérimentale de ce travail.*

*Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Fella et Youcef*

بسم الله الرحمن الرحيم

" وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب "

أحمدك ربي حمدا يليق بجلال وجهك وعظيم سلطانك .

وأزكى صلاة وأطيب سلام عليك يا سيدي يا رسول الله .



# الإهداء

أهدي هذا العمل الذي هو نتاج لثمرة ضلت تينع طيلة خمس سنوات من الجهد والعناء إلى اللذان كان لهما الفضل الكبير بعد الله عز و جل في إنجازه.

وحنانها و مروتني :إلى من جسمت تحت أقدامها جنة الخلد إلى من سهرت الليالي من أجلي و سقتني بدموعها محجوبة .

بحبها ، ربي أحفظها وأعطها الصحة والعافية ، أمي الحنون

والعمل و علمني إحترام إلى من تعب و تغرب و قطع المسافات البعيدة من أجلي إلى من علمني الصدق في الكلام الكبير و العطف على الصغير و غمرني بالحب و الأمان ، أطال الله في عمرك يا أبي الغالي : محمد .

إلى إخوتي : عامر ،عمار ، حسين ، عبد الرزاق و عبد الحق . و إلى أختي جميلة متمنيا لها النجاح في حياتها الدراسية.

إلى الأعزاء: نسيم ، ناجي ، حكيم ، دحماني ، مصطفى ، أحمد ، محمد و يوسف .....

إلى جميع زملاء الدراسة و إلى كل من ساهم في إنجاح هذا العمل من قريب أو من بعيد وأذكر بالأخص يرقي إلياس ، بوقلقال جميلة و ستاري.

إلى رفيقتي في هذه المذكرة : فلة التي لولاها لما اكتملت ، متمنيا لها مستقبلا زاهرا إن شاء الله تعالى.

إلى كل عائلة بن عيسى و بن يحيى .

إلى كل خريجي جامعة يحي فارس فرع هندسة مدنية دفعة 2013 .

إلى كل من لهم مكانة في قلبي و لم أذكرهم ، إلى كل من يحب يوسف .



# Dédicaces

*C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde après mon DIEU pour leurs sacrifices :*

*A Mes chers parents que dieu les gardes et préserve.*

*A Ma chère grande mère que je la souhaite une longue vie.*

*A Mon cher frère : Ahcene.*

*A la mémoire de mon frères Abdelkader « rabi yarhmo »*

*A Mes sœurs: Naima, Nadjia, Saida, Safia et Manel*

*A Mes beaux fréres*

*A Mes chers: Abdelmouméne, Adel, Zaki, Doaa, Bessmala, Ghofrane, Riham, Meriouma,… et surtout à Loudjaine*

*A toute la famille* ***« BENYAHIA»*** *sans exception.*

*A Mon binôme BENAISSA Youcef*

*A Mr IRKI Ilyes et Melle BOUKHELKHEL DJ et SETTARI CH*

*A ma chère sœur et amie : Hamida*

*A Mes amies : Aicha, Noura, Nawal, les 2 Fatima, Meriem, Hafidha, Besma, Fouzia, Selma, Amel, Souhila……*

*A Tous mes collègues de 2 ème année master Génie Civil promotion 2013*

# Fella

## ملخص

في السنوات الأخيرة واجهتنا عوائق على الترتيب الاقتصادي و الايكولوجي، مما أدت إلى ضرورة إعادة تقييم و تدوير العديد من البقايا على العموم و خاصة البقايا النباتية. ومثل كل البلدان في العالم، في كل عام كمية مهمة من هذه البقايا يمكن جمعها في كل مكان من الجزائر.هذا يمتحن إمكانية إعادة تقييم و تدوير بقايا النخيل و ألياف الحلفة الناتجة عن أكياس القهوة في الخرسانة ذاتية التسوية و ذلك بإضافة نسبتين من كل نوع من الألياف. الخصائص الفيزيائية و الكيميائية و ديمومة مختلف خرسانات البقايا حللت و قورنت.

## Résumé

Les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaire la valorisation et le recyclage de plusieurs déchets en général et en particulier les déchets végétaux. Comme dans tout les pays du monde, chaque année une quantité des déchets végétaux et cumulés un peut partout en Algérie. Ce travail examine la possibilité de valorisation et de recyclage des résidus dattiers et des fibres d'hafa issu des sacs du café dans le béton autoplaçant (BAP) en utilisation deux pourcentages d'ajout. Les propriétés physiques et mécaniques ainsi que la durabilité des différents des déchets sont analysés et comparés.

## Abstract

Recently, economic and ecological constraints have necessitated the recovery and recycling of waste in general and more particularity vegetable waste. As in any country in the world, each year a large amount of vegetable waste is accumulated in Algeria. This examines the possibility of recoverying and recycling of residues of date palm fibers and from halfa bags of coffee in the self compacting concrete (SCC) using two percentage added. The physical and mechanical properties and durability of various concrete waste properties are analyzed and compared.

**SOMMAIRE**

Remerciements

Dédicaces

Résumés

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations

**INTRODUCTION GENERALE** ..... 01

**Chapitre I : Synthèse bibliographique**

I.1 Introduction ..... 03

I.2 Béton ..... 04

I.2.1 Matériau béton ..... 04

I.2.2 Bétons spéciaux ..... 06

I.2.2.1 Béton à haute performance (BHP) ..... 06

I.2.2.2 Bétons auto-plaçant (BAP) ..... 07

I.2.2.3 Bétons de fibres ..... 08

I.3 Béton autoplaçant ..... 10

I.3.1 Historique ..... 10

I.3.2 Définition ..... 11

I.3.3 Constituants du béton autoplaçant ..... 13

I.3.3.1 Ciment ..... 13

I.3.3.2 Les granulats ..... 14

I.3.3.3 Les superplastifiants ..... 15

I.3.3.4 Les agents de viscosité ..... 16

I.3.3.5 Les entraineurs d'air ..... 17

I.3.3.6 Eau ..... 18

I.3.4 Propriétés du béton autoplaçant a l'état frais ..... 18

I.3.4.1 Capacité au remplissage ..... 18

I.3.4.2 La résistance a la ségrégation ..... 19

I.3.4.3 La capacité de passage ..... 19

I.3.5 Caractérisations des BAP ..... 21
I.3.5.1 Essais sur mortier frais ..... 22
I.3.5.2 Essais sur béton frais ..... 24
I.3.5.2.A Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow) ..... 24
I.3.5.2.B Essai d'entonnoir (V-funnel) ..... 25
I.3.5.2.C Essai de la boite en L (L-Box) ..... 26
I.3.5.2.D Essai de la couronne J (J-Ring) ..... 27
I.3.5.2.E Essai de l'écoulement au tube en U (U-Box) ..... 28
I.3.5.2.F Essai de l'écoulement au caisson ..... 29
I.3.5.2.G Essai de la passoire ..... 30
I.3.5.2.H Essai de stabilité au tamis ..... 30
I.3.5.2.I Essai de la colonne ..... 32
I.3.5.2.J Essai à la colonne LMDC ..... 32
I.3.5.2.K Test de pénétration ..... 33
I.3.5.2.L Essai de ressuage ..... 34
I.3.5.3 Essais sur béton durci ..... 35
I.3.5.3.1 Méthode des ultrasons ..... 35
I.3.5.3.2 Méthode des rayons gamma ..... 36
I.3.5.4 Propriétés des BAP à l'état durci ..... 36
I.3.5.4.1 Propriétés mécaniques ..... 36
I.3.5.4.1.1 Résistance mécanique ..... 36
I.3.5.4.1.2 Module d'élasticité ..... 37
I.3.5.4.1.3 Retrait ..... 37
I.3.5.4.2 Propriétés physicochimiques et durabilités ..... 39
I.3.5.4.2.1 Perméabilité aux gaz ..... 40
I.3.5.4.2.2 Migration des chlorures ..... 41
I.3.5.5 La formulation des bétons autoplaçants ..... 42
I.3.5.5.1 Formulation par la méthode générale ..... 44
I.3.5.5.2 Formulation JSCE ..... 46
I.3.5.5.2 Formulation par minimisation du volume de pate (CBI méthode ou méthode SUEDOISE) ..... 47
I.3.5.5.3 Méthode Française (LCPC) ..... 49
I.3.5.6 Fabrication des BAP ..... 49
I.3.5.7 Mise en œuvre des BAP ..... 51

I.4 Bétons de fibres ..... 49
I.4.1 Quelques fibres dans le béton ..... 51
I.4.1.1 Fibres métalliques ..... 53
I.4.1.2 Fibres de fonte amorphe ..... 53
I.4.1.3 Fibres de verre ..... 54
I.4.1.4 Fibres de polypropylènes ..... 55
I.4.1.5 Les fibres végétales ..... 55
I.4.1.5.1 Classification des fibres végétales ..... 55
I.4.1.5.2 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales ..... 56
I.4.1.5.3 Caractéristiques chimiques des fibres végétales ..... 57
I.4.2 Formulation des bétons de fibres ..... 60
I.4.3 Propriétés des bétons de fibres ..... 62
I.4.3.1 Propriétés mécaniques ..... 64
I.4.3.1.1 Résistance à la compression ..... 64
I.4.3.1.2 Résistance à la traction directe ..... 64
I.4.3.1.3 Résistance à la fatigue ..... 64
I.4.4.2 Fissuration du béton de fibre ..... 65
I.5 BAP renforcé de fibres végétales ..... 65
I.5.1 La formulation BAP renforcé de fibres végétales ..... 66
I.5.2 Les propriétés des BAP de fibres végétales à l'état frais ..... 67
I.5.2.1 Ouvrabilité ..... 70
I.5.2.2 Ouvrabilité des BAP fibrés en milieu confiné ..... 70
I.5.2.3 Stabilité des BAP fibrés ..... 72
I.5.3 Les propriétés des BAP de fibres végétales à l'état durci ..... 73
I.5.3.1 Propriétés physiques du BAP fibrés ..... 75
I.5.3.1.1 Porosité ..... 75
I.5.3.1.2 La perméabilité aux gaz ..... 75
I.5.3.1.3 Mesure de la ségrégation ..... 75
I.5.3.2 Propriétés mécaniques du BAP fibrés ..... 76
I.5.3.2.1 Résistance à la compression ..... 77
I.5.3.2.2 Module d'élasticité ..... 77
I.6 Conclusion ..... 81

**Chapitre II : Méthodologie des essais**


II.1 Introduction ..... 82
II.2 Caractérisation des matériaux utilisés ..... 83
II.2.1 Ciment ..... 83
II.2.2 Granulats ..... 84
II.2.2.1 Sable ..... 84
II.2.2.2 Gravier ..... 85
II.2.3 Eau de gâchage ..... 86
II.2.4 Superplastifiant ..... 86
II.2.5 Fibres végétales ..... 87
II.2.5.1 Régimes ..... 87
II.2.5.2 Halfa ..... 88
II.3 La formulation du béton ..... 88
II.4 Technique expérimentale ..... 91
II.4.1 Séquence de malaxage du béton ..... 91
II.4.2 Béton frais ..... 93
II.4.2.A Essais d'étalement et $T_{50}$ ..... 94
II.4.2.B Essai J-Ring ..... 95
II.4.2.C Essai d'entonnoir en V (V-funnel) ..... 97
II.4.2.D Essai de la boîte en U (U-Box) ..... 98
II.4.3.E Essai de stabilité au tamis ..... 99
II.4.3.F Essai de la boîte en L (L-Box) ..... 100
II.4.3.G L'air occlus…….. ..... 101
II.4.3.H La densité ..... 102
II.4.3 Démoulage et conservation des éprouvettes ..... 103
II.4.4 Béton durci ..... 104
II.4.4.1 Essai ultrasonique ..... 104
II.4.4.2 Essai scléromètrique ..... 105
II.4.4.3 Résistance à la compression ..... 108
II.4.4.4 Résistance à la traction par flexion ..... 109
II.4.4.5 Retrait et gonflement ..... 110
II.4.4.6 Résistance à la compression ..... 113
II.5 Conclusion ..... 114

**Chapitre III : Résultats et interprétations**

III.1 Introduction ..... 115
III.2 Essai sur un béton frais ..... 115
III.2.A Effet des fibres végétales sur la capacité de passage et $T_{50}$ du BAP et la différence des hauteurs (J-Ring) ..... 116
III.2. B Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement des BAP à travers V-funnel ..... 118
III.2.C Effet des fibres végétales sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U- Box) ..... 119
III.2.D Effet des fibres végétales sur la résistance à la ségrégation des BAP ..... 120
III.2.E Effet des fibres végétales sur le taux de remplissage et ($T_{20}$, $T_{40}$) des BAP à travers (L-BOX) ..... 120
III.2.F Effet des fibres végétales sur la densité des BAP ..... 122
III.2.H Effet des fibres végétales sur l'air occlus des BAP ..... 122
III.3 Essais sur un béton durci ..... 123
III.3.1 Effet des fibres végétales sur la vitesse ultrasonique des BAP ..... 123
III.3.2 Effet des fibres végétales sur la dureté des surfaces du BAP ..... 124
III.3.3 Effet des fibres végétales sur la résistance à la compression du BAP ..... 125
III.3.4 Effet des fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion du BAP ..... 126
III.3.5 Effet des fibres végétales sur le retrait et le gonflement des BAP ..... 127
III.3.6 Effet des fibres végétales sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP ..... 128
III.3 Conclusion ..... 129

**CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMENDATIONS** ..... 131
**Références bibliographique**
**Annexes**

## LISTE DES TABLEAUX


| Tableau | Titre | Page |
|---|---|---|
| Tableau I.1 | Critères de stabilité | 31 |
| Tableau I.2 | Différents types de fibres | 53 |
| Tableau I.3 | Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées | 54 |
| Tableau I.4 | Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales | 59 |
| Tableau I.5 | Composition chimique de quelques fibres végétales | 61 |
| Tableau I.6 | Définition de la formulation | 63 |
| Tableau I.7 | Propriétés physiques des fibres | 67 |
| Tableau I.8 | Résultats récapitulatifs des différents essais de caractérisation du BAP fibrés 'FbA' | 69 |
| Tableau I.9 | Dosages optimaux de BAP fibrés | 70 |
| Tableau I.10 | Résultats de la viscosité ' $\eta_p$ ' et la contrainte de cisaillement '$\tau_0$ ' | 72 |
| Tableau I.11 | Compositions et propriétés des BAP témoins fibrés | 74 |
| Tableau I.12 | Résultats de la porosité du BAP pour différents dosages de fibre | 75 |
| Tableau II.1 | L'analyse chimique du ciment et composition du clinker | 83 |
| Tableau II.2 | Propriétés physiques et mécaniques des graviers utilisés | 85 |
| Tableau II.3 | Compositions des différents BAP étudiés dans $1m^3$ du béton | 90 |
| Tableau II.4 | Essais de caractérisation sur bétons frais | 93 |
| Tableau II.5 | Essais de caractérisation sur bétons durcis | 104 |
| Tableau III.1 | Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais | 115 |

| | | |
|---|---|---|
| Tableau III.2 | Résultats des vitesses ultrasoniques du différents BAP | 116 |
| Tableau III.3 | Résultats de la résistance à la compression à partir le scléromètre du différents BAP | 123 |
| Tableau III.4 | Résultats de Résistance à la compression et traction du différents BAP | 124 |
| Tableau III.5 | Résultats de retrait et gonflement du différents BAP | 125 |
| Tableau III.6 | Résultats de l'absorption d'eau du différents BAP | 127 |
| Tableau III.7 | Résultats de Résistance à la compression et traction du différents BAP | 128 |

# LISTE DES FIGURES


| Figure | Titre | Page |
|---|---|---|
| Figure I.1 | Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP | 12 |
| Figure I.2 | Résumé du processus de fabrication du ciment | 14 |
| Figure I.3 | Exemples de motifs (R représente H ou un groupe alkyle | 15 |
| Figure I.4 | Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures | 20 |
| Figure I.5 | Approche générale pour aboutir à un béton caractère autoplaçant | 20 |
| Figure I.6 | Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton | 21 |
| Figure I.7 | Essai d'Etalement pour mortier | 22 |
| Figure I.8 | Essai à l'Entonnoir pour mortier | 23 |
| Figure I.9 | Essai d'étalement pour les mortiers | 23 |
| Figure I.10 | Essai d'entonnoir pour les mortiers | 23 |
| Figure I.11 | Essai d'étalement (slump flow) | 24 |
| Figure I.12 | Essai d'entonnoir « V-funnel» | 25 |
| Figure I.13 | Essai d'entonnoir « O-funnel» | 25 |
| Figure I.14 | Schématisation de l'essai de la boite en L (L-Box) | 26 |
| Figure I.15 | Essai J-Ring | 27 |
| Figure I.16 | Schématisation de l'essai du tube en U | 28 |
| Figure I.17 | Schématisation de l'essai du caisson | 29 |
| Figure I.18 | Schématisation de l'essai de la passoire | 30 |
| Figure I.19 | Schématisation de l'essai de stabilité au tamis | 31 |
| Figure I.20 | Essai de la colonne | 32 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure I.21 | Dispositif de l'essai à la colonne LMDC | 33 |
| Figure I.22 | Essai à la bille | 33 |
| Figure I.23 | Essai de ressuage | 34 |
| Figure I.24 | Appareil ultrasons | 35 |
| Figure I.25 | Phénomène de ressuage | 38 |
| Figure I.26 | Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T=20°C, 50% HR) | 38 |
| Figure I.27 | Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP et deux bétons vibrés correspondants | 41 |
| Figure I.28 | Coefficient de migration des ions de chlore de trois BAP et de deux bétons vibrés correspondants | 41 |
| Figure I.29 | Méthode de mise en place du BAP sur chantier | 51 |
| Figure I.30 | Schématisation des fibres végétales | 60 |
| Figure I.31 | Variation de la résistance en fonction du % de cellulose | 60 |
| Figure I.32 | Variation de la résistance en fonction de l'angle spiral | 60 |
| Figure I.33 | Courbe d'étalement de BAP additionnés de FbA | 70 |
| Figure I.34 | Evolution de Slump en fonction du temps | 71 |
| Figure I.35 | Résultats de L-Box pour différents dosages de fibres | 72 |
| Figure I.36 | Résultats de J-Ring pour différents dosages de fibres | 73 |
| Figure I.37 | Evolution de la laitance en fonction du dosage en superplastifiant | 73 |
| Figure I.38 | Evolution de la perméabilité du BAP en fonction de la porosité pour différents dosages de fibres | 76 |
| Figure I.39 | Observation de la ségrégation des BAP témoins fibrés | 76 |
| Figure I.40 | Evolution de La résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP | 77 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure I.41 | Evolution du module d'élasticité en fonction de l'âge du BAP | 78 |
| Figure I.42 | Quelques observations au MEB : (a) BAP non fibré et (b) BAP fibré | 78 |
| Figure I.43 | Relation entre module d'élasticité et la résistance à la compression comparant le BAP fibré et non fibré | 79 |
| Figure II.1 | Le ciment utilisé | 84 |
| Figure II.2 | Sable de Bouguezoul | 84 |
| Figure II.3 | Gravier de Mont Guorno 3/8 | 85 |
| Figure II.4 | Gravier de Mont Guorno 8/15 | 85 |
| Figure II.5 | Analyse granulométrique des granulats | 86 |
| Figure II.6 | MEDAFLOW 30 | 87 |
| Figure II.7 | Les fibres des régimes | 87 |
| Figure II.8 | Les fibres d'halfa | 88 |
| Figure II.9 | Séquence de malaxage du béton autoplaçant témoin et fibré | 92 |
| Figure II.10 | Développement de l'essai d'étalement | 95 |
| Figure II.11 | Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure des hauteurs | 96 |
| Figure II.12 | Protocole de l'essai du J-Ring | 96 |
| Figure II.13 | Dimensions de l'entonnoir (V-funnel) | 97 |
| Figure II.14 | Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel) | 98 |
| Figure II.15 | Dimensions de la boite en U (U-Box) | 98 |
| Figure II.16 | Protocole de l'essai de la boîte de U (U-Box) | 99 |
| Figure II.17 | Protocole de l'essai de stabilité au tamis | 100 |
| Figure II.18 | Dimensions de l'essai de L-Box | 100 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure II.19 | Protocole de l'essai de la boîte de L-Box | 101 |
| Figure II.20 | Aéromètre à béton | 102 |
| Figure II.21 | Mesure de la densité du béton | 102 |
| Figure II.22 | Conservation des éprouvettes | 103 |
| Figure II.23 | Étalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage | 105 |
| Figure II.24 | Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline | 105 |
| Figure II.25 | Mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores | 105 |
| Figure II.26 | Le scléromètre | 105 |
| Figure II.27 | Mesure de l'indice de rebondissement par le scléromètre | 106 |
| Figure II.28 | Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes | 107 |
| Figure II.29 | Presse hydraulique (2000 kN) | 108 |
| Figure II.30 | Essai de compression | 109 |
| Figure II.31 | Essai de traction par flexion | 109 |
| Figure II.32 | Réctractomètre | 110 |
| Figure II.33 | Etalonnage de l'appareil | 111 |
| Figure II.34 | Appareillage pour la mesure du retrait | 112 |
| Figure II.35 | Absorption d'eau par succion capillaire | 113 |
| Figure III.1 | Effet des fibres végétales sur l'étalement du BAP sans et avec J-Ring | 116 |
| Figure III.2 | Effet des fibres végétales sur le temps de passage $T_{50}$ du BAP sans et avec J-Ring | 117 |
| Figure III.3 | Effet des fibres végétales sur la différence des hauteurs du BAP $H_{ext}$-$H_{int}$ à travers (J-Ring) | 118 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure III.4 | Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement du BAP à travers (V-Funnel) | 118 |
| Figure III.5 | Effet des fibres végétales sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U-Box) | 119 |
| Figure III.6 | Effet des fibres végétales sur la résistance à la ségrégation du BAP | 120 |
| Figure III.7 | Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ à travers (L-Box) | 120 |
| Figure III.8 | Effet des fibres végétales sur le taux de remplissage ($H_2/H_1$) BAP à travers (L-Box) | 121 |
| Figure III.9 | Effet des fibres végétales sur la densité du BAP | 122 |
| Figure III.10 | Effet des fibres végétales sur l'air occlus du BAP à partir l'aéromètre | 122 |
| Figure II.11 | Effet des fibres végétales sur la vitesse ultrasonique du BAP | 123 |
| Figure II.12 | Effet des fibres végétales sur la résistance à la compression du BAP à l'aide de scléromètre | 124 |
| Figure III.13 | Effet des fibres végétales sur la résistance à la compression du BAP | 125 |
| Figure III.14 | Effet des fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion du BAP | 126 |
| Figure III.15 | Effet des fibres végétales sur le retrait et le gonflement du BAP | 127 |
| Figure III.16 | Effet des fibres végétales sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP | 129 |

## NOTATIONS

**D** La dimension du plus gros granulat

**C=CaO** La chaux

**S=$SiO_2$** La silice

**A=$Al_2O_3$** L'alumine

**F=$Fe_2O_3$** L'oxyde de fer

**3CaO $SiO_2$ ($C_3S$)** Le silicate tricalcique impur (Alite)

**2CaO $SiO_2$ ($C_2S$)** Le silicate bi-calcique impur (Bélite)

**3CaO $Al_2O_3$, ( $C_3A$)** L'aluminate tricalcique (Célite)

**4CaO $Al_2O_3$ $Fe_2O_3$ (C4AF)** L'alumino-ferrite tétra-calcique

**BHP** Béton haute performance

**BHP** Béton haute performance

**BTHP** Béton très haute performance

**BAP** Béton autoplaçant

**BFUP** Béton fibre à ultra haute performance

**BCD** Béton caverneux drainant

SCC Self compacting concrete

**f** Les fillers

**E / C** Eau/ Ciment

**E /L** Eau/Liant

**BO** Béton ordinaire

**PNS** Polynaphatalaine

**PMS** Polymélamine sulfonate

**LS** Lignosulfoates modifiés

**PC** Polycarboxylate

**PA** Polyacrylate

**POE** Polyoxéthylène

**PE** Polyéthylène

**H** Hauteur

**$T_{50}$** temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm

**$T_{40}$** temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 40 cm

**$T_{20}$** temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 20 cm

**R** Le taux de remplissage

**LMDC** Laboratoire de matériaux de construction

**t** Temps

**T** Température

**G/S** Gravier/Sable

**BAN** Béton autonivelant

**G** Gravier

$\mathbf{G_{lim}}$ Volume absolu 1 m3 de gros granulats

**F** Les fines

$\mathbf{R_b}$ Risque de blocage

$\mathbf{V_w}$ Volume d'eau

$\mathbf{V_p}$ Volume de pâte

$\mathbf{V_{vides}}$ Volume des vides

**Sp** Superplastifiant

**C-S-H** Silicate de calcium hydraté

$\boldsymbol{\tau_0}$ seuil de cisaillement

$\boldsymbol{\tau}$ contrainte de cisaillement

$\boldsymbol{\mu}$ Viscosité

$\dot{\gamma}$ Gradient de vitesse

**S** Affaissement final

**T** Temps d'affaissement

**CPJ-CEM II/B** Ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa.

**LCPC** Laboratoire central des ponts et des chaussés

$\mathbf{T_{VF}}$ Temps d'écoulement à l'entonnoir

***P*** Pourcentage de laitance

***Vu*** Vitesse ultrasonique

**FbA** Fibre issu de recyclage des papiers type A

**FbB** Fibre issu de recyclage des papiers type B

**FbC** Fibre issu de recyclage des papiers type C

**FbD** Fibre issu de recyclage des papiers type D

$\mathbf{D_{moyen}}$ Etalement moyen

$\mathbf{E_{eff}}$ Eau éfficace

$\Delta\mathbf{H}$ Différence des hauteurs

$\mathbf{H_{int}}$ Hauteur interieur

$\mathbf{H_{est}}$ Hauteur exterieur

$\mathbf{R_t}$ La résistance a la traction

$\mathbf{R_C}$ La résistance a compression

**K** Coef ;

**d** Diamètre des fibres

**P** Pourcentage en volume des fibres

$\Delta\mathbf{L}$ Variation de longueur par apport à la longueur origine,

$\mathbf{L_0}$ Longueur de base, prise égale à 160mm.

$\Delta\mathbf{M}$ Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

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

**M** Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge

**I** Moment d'inertie de la section transversale

**$V_f$** Volume des fibres.

**$T_{500}$** Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 500 mm.

**FR** Fibres régimes

**FH** Fibres halfa

**BAPFR1%** Béton autoplaçant de fibres régimes 1%

**BAPFR1.3%** Béton autoplaçant de fibres régimes 1.3%

**BAPFH1%** Béton autoplaçant de fibres halfa 1%

**BAPFH1.3%** Béton autoplaçant de fibres halfa 1.3%

**BAPT** Béton autoplaçant témoin (sans fibres)

**R** Retrait

**G** Gonflement

# INTRODUCTION GENERALE

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'idée du développement d'un béton très fluide qui ne nécessite pas lors de sa fabrication la mise en place des systèmes de vibration a été lancée en premier lieu par des chercheurs de l'université de Tokyo vers 1980. Leur objectif était de supprimer les opérations couteuses liées à la vibration, et le ressuage afin d'accroitre la productivité du chantier. Ces bétons sont connues sous la dénomination « BAP » comme béton autoplaçant ou « SCC » comme Self Compacting Concrete. Depuis, les grands groupe industriels japonais (Taisi, Kajima, Obaychi, etc.) ont commercialisé les BAP vu les intérêts techno-économiques qu'ils présentent :

- ✓ Une diminution du temps du personnel lors de la mise en place du béton en chantier.
- ✓ Obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation.
- ✓ Offre de garantie de résultats en matière de qualité de parement brut. Cet avantage est difficile à évaluer économiquement. Il faut, toutefois, noter qu'il évite tous les travaux et toutes les dépenses liées aux reprises et aux ragréages, ce qui n'est pas négligeable.
- ✓ Possibilité de réaliser les structures des formes hypercomplexes. Les architectes et les maitres d'ouvrage sont très friands de ce genre de nouveautés qui leur offre des possibilités de créativité extraordinaires.
- ✓ Bonne pompabilité permettent le transport sur de plus long distance, mais aussi et surtout l'injection du béton dans le coffrage, ce qui va dans le sens d'une amélioration de la qualité des parements. L'injection du béton par pompage au pids des coffrages a pour conséquence de chasser l'air vers le haut, supprimant ainsi quasiment les risques de bullage sur les parements. En le mettant en œuvre de cette façon, on supprime un des problèmes inhérents à ce type de béton, évoqué précédemment.
- ✓ Réduction importante des nuisances sonores sur le chantier du fait de l'absence de vibration. En éliminant l'opération de vibration, on libère du temps de grue

Certains facteurs peuvent constituer un frein quant à une grande diffusion du BAP :

- ✓ Le BAP exerce une poussée sur les coffrages plus importante qu'un béton classique. Les coffrages doivent dimensions et conçus pour résister à ces contraintes mécaniques aux s'ajoutent des conditions d''étanchéité structurales.

Ceci entraine un cout supplémentaire d'équipement. En plus, l'utilisation des BAP implique un choix rigoureux du type d'huile ou de cires de décoffrage afin de limiter les risques de défaut de parement.

- ✓ Le BAP exige l'utilisation des adjuvants, des fines et un dosage en ciment plus élevé. Il coute donc plus cher qu'un béton courant à résistance mécanique équivalente.
- ✓ Le BAP est de formulation critique. Cela signifie qu'il perd sa qualification de BAP à la moindre variation du dosage des différents constituants. Il doit donc faire l''objet d'un contrôle permanant à la production.
- ✓ Le faible ressuage des bétons autoplaçants les rend plus vulnérables vis-à-vis des effets du retrait plastique.

Les premières études effectuées sur les BAP visaient essentiellement à mettre au point des formulations qui répondent à des exigences de fluidité. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Malgré le nombre de travaux importants qu'on dénombre dans la littérature sur les BAP :

méthodes de formulation, durabilité et caractéristique mécanique, des verrous technologiques méritent d'êtres levés :

- ✓ Recherche d'une méthode de formulation peu couteuse mais conduisant à des BAP hautes performances ?
- ✓ La valorisation des résidus des dattiers (régime) et les fibres issus du recyclage des sacs du café (halfa) sous forme de fibres courtes dans les BAP conduit elle à des solutions viables en termes de mise en œuvre, de résistances mécaniques et de durabilité ?

Les objectifs de ce travail sont d'amener des réponses à ces questions. Le mémoire est composé de trois chapitres :

**Le premier chapitre** est un état de l'art sur les différents types de béton, le BAP en termes de propriétés mécanique et de durabilité, de rhéologie, de la formulation, effet des fibres sur la rhéologie des BAP, les caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçant … etc

**Le deuxième chapitre** est caractérisation des matériaux entrent dans la fabrication du BAP et présentation des essais qui sont réalisés dans laboratoire.

**Le troisième chapitre** est une interprétation des résultats des essais qui on a cité dans le chapitre précédent.

# CHAPITRE I

# *Synthèse Bibliographique*

## I.1 Introduction

Toute étude bibliographique est une synthèse de l'art. Sa conclusion et sa critique permettent de dégager les caractéristiques principales que doit posséder le matériau présenté dans ce mémoire, en l'occurrence le béton armé de fibres métalliques.

Notre approche expérimentale est basée sur les principes de mécanique des milieux continus et de certaines lois comportementales. Le choix du matériau est au centre du processus de conception d'un produit mécanique. Un matériau nouveau apporte de nouvelles idées et de nouvelles possibilités de création, il est au cœur de l'innovation. En l'utilisant le chercheur va pouvoir améliorer la solution technologique en lui donnant un volume, un poids, une résistance. L'objectif essentiel réside dans l'étude et l'optimisation des propriétés mécaniques et physiques des matériaux hétérogènes et poreux rencontrés en génie civil notamment le béton autoplaçant renforcé de fibres végétales.

La démarche est multiple, elle consiste à développer à la fois des études expérimentales et des travaux de modélisation pour finalité l'aboutissement du transfert technologique du laboratoire vers les chantiers ou l'industrie. Il est nécessaire d'allier les propriétés mécaniques des matériaux au comportement des structures avec pour objectif l'optimisation des dimensionnements des éléments et la prédiction de leur fonctionnement sous sollicitations spécifiques.

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement, d'aspect. La technologie du béton ne cesse dès lors de se compliquer. On a ainsi assisté à l'émergence de nouveaux bétons (B.H.P, auto plaçant, auto compactant, recyclés etc.). De plus, des nouveaux matériaux, permettant d'accroître les performances des bétons de manière significative, ont été introduits dans sa composition, à l'instar des fibres végétales. Ces nouveaux bétons nécessitent souvent une adaptation des méthodes traditionnelles de fabrication et de mise en œuvre.

L'évolution dans la conception des ouvrages en béton a nécessité, de la part des concepteurs et maîtres d'ouvrages, non seulement la recherche pour l'obtention d'un ouvrage simplement fonctionnel mais aussi une intégration plus harmonieuse de ce dernier et une durée de vie plus élevée et enfin un coût des plus faibles possible. Parmi ces évolutions, une discipline à part entière de la conception des ouvrages en béton a émergé.

La durabilité des structures. Cette durabilité trouve son expression aussi bien du point de vue de l'intégrité mécanique de l'ouvrage que dans celui de la tenue en service. Ainsi, il n'est plus seulement requis de réaliser le dimensionnement d'un ouvrage comme un cas particulier mais aussi d'y intégrer des contraintes de résistance dans le temps, de résistance à des agents agressifs etc.… **[1]**.

## I.2 Béton

On appelle mortiers ou bétons les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau et de granulats avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants. C'est la dimension D du plus gros granulat qui détermine l'appellation : mortier pour D ≤4mm, béton pour D ≥4 mm.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et l'adjuvant forment la pate liante. Lorsqu'il n'ya pas de squelette granulaire, on parle de pate pure de ciment **[1]**.

### I.2.1 Matériau béton

L'histoire du béton remonte à 2000 ans avant J.C. Ce sont les romains, qui les premiers ont inventés une pâte « dure comme la pierre », à base de chaux vive. Plus tard (19ème siècle), les véritables recherches approfondies sur les propriétés de la chaux furent entrepris par SMEATON, VICAT et ASPDIN qui montrèrent dans un premier temps que le clinker issu de la calcination du mélange « calcaire – argile » (particules anhydres) fournissait une meilleure hydraulicité au liant. En 1855, du gypse ($SO_3$) en petite quantité ajoutée au clinker, permit d'obtenir au contact de l'eau, une étringite (mélange formant une étreinte des constituants par une réaction chimique), homogène et maniable pendant un laps de temps. Ce mélange original « gypse – clinker » fut breveté et possède encore aujourd'hui l'appellation Ciment Portland Artificiel. Puis rapidement les mortiers et les bétons furent mis en œuvre en introduisant dans la pâte de ciment respectivement du sable ou des granulats. En parallèle à de nombreuses recherches sur leur composition et leur comportement ces « nouveaux matériaux composites » furent rapidement employés dans la construction.

Les résultats d'analyse des différentes phases (ciment – granulat – eau) précisent l'influence de chacun des constituants. Classiquement, le ciment Portland se compose d'environ 50% de silicate tri calcique ($C_3S$), 20% de silicate bi calcique ($C_2S$), 5% d'alumino - ferrite tétra calcique ($C_4AF$) et 15% d'aluminate tri calcique ($C_3A$). [C = CaO ; S = $SiO_2$ ; A = $Al_2$ ; F = $FeO_2$].

Lors de l'hydratation du ciment, une forte teneur du composé $C_3S$ contribue à l'augmentation rapide de la résistance au jeune âge avec un fort dégagement de chaleur.

Cette réaction exothermique est accentuée par la présence de $C_3A$ qui constitue un élément chimique essentiel dans la fabrication du ciment et pour l'obtention d'une étringite homogène en combinaison avec le composé $C_4AF$. [**2**]

Cependant ces gradients thermiques sont la source de fissuration au sein de l'élément de béton car la température peut atteindre 70°C. Le pourcentage de $C_3A$ doit alors être le plus faible possible car il est également plus vulnérable aux sulfates et sa forte teneur implique un dosage plus important en gypse.

Même si l'action du gypse peut entraîner un fluage plus important du béton à court terme (dû à la finesse du liant), il ne possède aucune influence à long terme. Seul le composé $C_2S$ agit sur le comportement à long terme du béton car sa réaction est plus lente. Il contribue principalement au développement de la résistance. C'est pourquoi les bétons du début du 20ème siècle, à la forte teneur en $C_2S$, ont développé une résistance à long terme, deux fois supérieure à celle obtenue à 28 jours. Actuellement, les bétons confectionnés possèdent une teneur en $C_2S$ nettement plus faible, qui ne permet pas de tenir compte d'une augmentation de la résistance au-delà de 28 jours, mais plutôt, d'une diminution après 10 ans de maturité. [**2**]

L'hydratation du ciment n'est jamais complète (60 à 70% des particules sont hydratées). Isolées de tout contact avec l'extérieur, les particules anhydres peuvent attendre des années avant d'être enfin en contact avec un composé permettant l'hydratation.

Un béton âgé de 100 ans peut encore développer des réactions d'hydratation. La phase solide ou xérogel [**3**] obtenue par hydratation est beaucoup plus poreuse à l'interface entre le gel de ciment et le granulat. Cette couche d'interface de plus faible résistance appelée aussi « auréole de transition » est composée de fines aiguilles d'étringite et de particules d'hydroxydes de calcium non réactives enveloppant le grain inerte. Elle est la zone de fissures prépondérante de par sa plus grande porosité (capacité de rétention d'eau importante accentuée par la porosité du granulat) et sa structure fragile en aiguilles qui lui confère une plus faible résistance aux efforts de traction et de cisaillement.

Le béton généralement caractérisé par des essais à 28 jours, présente en vieillissant une configuration thermo dynamiquement instable compte tenu des réactions encore possibles à long terme. [**3**] Au-delà d'une consistance plastique initiale au moment de la mise en œuvre (viscosité importante), le béton développe tout au long de sa vie, une fragilité accrue caractérisée par une rupture plus brutale. [**4**]

Les propriétés des bétons tentent d'être améliorées en fonction de leur utilisation (structures, réparation). C'est pourquoi, de plus amples recherches s'attachent à déterminer l'effet d'ajouts cimentaires (cendres volantes, laitiers, fumée de silice..) qui apportent des propriétés intéressantes au béton (ouvrabilité, résistance, porosité, facilité de mise en œuvre) et celui d'additifs chimiques tels que

les plastifiants qui agissent sur l'ouvrabilité des bétons. Cependant leurs effets nécessitent des études approfondies sur le comportement différé à court et à long terme des bétons.

A cette étape on peut définir alors la notion des bétons spéciaux, donc quelles sont les bétons spéciaux, et quelles sont leurs propriétés.

### I.2.2 Bétons spéciaux

#### I.2.2.1 Béton à haute performance (BHP)

Les bétons de hautes performances « BHP » ont d'abord été appelés « bétons de hautes résistances», car c'est cette caractéristique facilement mesurable qui a fait des progrès spectaculaires. Elle est passée de 30 à 35 MPa il y a quelques années, à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances (« BTHP »), voire plus de 200 pour des bétons de laboratoire.

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité. Ils sont également plus résistants aux agents agressifs, aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Les bétons HP permettent de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées ou des ouvrages subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel).Ils apportent aussi des résistances précoces élevées au béton, ce qui permet d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier **[1]**.

**Composition**

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, c'est-à-dire de son pourcentage de vides, ainsi que le prévoit la théorie de Féret. Celle-ci établit une proportionnalité entre la résistance et l'inverse du carré du volume d'air et d'eau libre.

Les fumées de silice ont une action sur la granulométrie du mélange, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

Les formulations actuelles de béton HP comportent le plus souvent en moyenne 400 à 500 kg de ciment, environ 700 kg de sable et 1 000 à 1 100 kg de gravillons. L'emploi d'un superplastifiant dosé entre 1 et 2 % du poids de ciment permet de réduire la teneur en eau de gâchage à une valeur comprise entre 140 litres et 160 litres **[1]**.

**Propriétés**

• Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition. Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas (0,30 à 0,35). Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 cm dans la plupart des cas.

• Pour le béton durci, la propriété fondamentale sur laquelle on a déjà insisté et dont découlent la plupart des autres, est sa faible porosité. Un béton courant présente une porosité de 10 à 12 % ; pour un béton HP, elle est inférieure à 5 %.

• La durabilité est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. On constate, en particulier, une amélioration de la résistance aux agressions chimiques, qui se traduit par un comportement favorable en milieu marin ou en présence d'eaux agressives. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures. Les bétons HP présentent généralement une résistance au gel amélioré.

• L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées **[1]**.

### I.2.2.2 Bétons auto-plaçant (BAP)

Les maîtres d'ouvrages, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton et préfabricants ont toujours recherché un béton ayant :

• une mise en place aisée ;

• un bon remplissage des coffrages ;

• un parfait enrobage des armatures ;

• une forte compacité.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armature, les formulations de bétons ont dû s'adapter.

Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est plus devenue nécessaire. Le béton auto-plaçant était né...

Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « superplastifiants ». La base de ces adjuvants est une molécule complexe qui retarde l'hydratation du ciment et augmente considérablement la dispersion des grains de ciment.

**Composition**

Les BAP ont des compostions granulométriques fortement chargées en éléments fins. Des adjuvants de type « superplasitifants », ou plastifiants « réducteurs d'eau » sont utilisés systématiquement. Le rapport E/C + f, facteur principal dans la qualité d'un BAP, est voisin de 0,352 **[1]**.

**Caractéristiques**

Un BAP se caractérise par son hyperfluidité dont le seul moteur de mise en place est la gravité sans recours à la vibration.

On a cité ces bétons à titre d'exemple, mais il ya plus que ces derniers qui sont par exemple :

- Le béton fibre a ultra hautes performances (**BFUP**)
- béton caverneux drainant (**BCD**)
- béton de fibre …etc

Parmi ces bétons on s'intéresse au béton de fibres végétales, **donc quelle est le béton auroplaçant de fibres végétales et quelles sont leurs caractéristiques ?**

### I.2.2.3 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.

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.

D'un point de vue général et simplifié, les composites ciments fibres sont constitués des deux phases suivantes :

- la matrice cimentaire

- les fibres de renfort

La valorisation des sous produits est devenue une priorité dans la recherche appliquée et touche au domaine du développement durable.

L'objectif est de recycler des « déchets » d'une part pour participer rationnellement à une économie de récupération et d'autre gagner en autonomie en utilisant des produits locaux ne demandant pas de gros investissements puisqu'ils sont utilisés tels quels et ne nécessitent pas de transformation .

La composition de la matrice doit répondre à des exigences de compacité et de fluidité, la résistance à la compression n'étant que le résultat et non le but de notre démarche. L'optimisation du renfort s'appuie sur l'analyse du processus de fissuration en traction des matrices cimentaires et conduit à l'utilisation de différentes tailles et provenances de fibres. Cette matrice cimentaire est composée de ciment, d'eau et de granulats **[1]**.

## I.3 Béton autoplaçant

### I.3.1 Historique

Béton autoplaçant ou autocompactant, ce type de béton a été proposé par OKAMURA en 1986 **[5].** Le premier prototype a été accompli en 1988 en utilisant des matériaux disponibles sur le marché Japonais. Ce béton a été appelé *"Béton à Haute Performance"* et a été défini en trois états comme suit **[6] :**

1. **Etat frais :** autoplaçant.
2. **Jeune âge :** action d'éviter des défauts initiaux.
3. **Etat durci** : protection contre des facteurs externes.

Presque en même temps, le béton à haute performance a été défini par le professeur AITCIN, comme un béton à durabilité élevée due au faible rapport eau/ciment, depuis le béton à haute performance a été répandu autour du monde pour ce référer aux bétons à durabilité élevée. Par conséquent, OKAMURA a changé le nom du béton proposé par "Béton Autoplaçant à Haute Performance" **[6]**.

Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA **[6] [7]**, et en 1992 OZAWA et d'autres collègues ont présenté un papier sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul **[8]**. Cette présentation a accéléré l'intérêt international pour le béton autoplaçant.

En 1998 le premier atelier international sur le béton autoplaçant été tenu à Kochi au Japon. A travers les efforts de Ozawa et ses collègues une recherche plus intensive prospérée, particulièrement à de grandes compagnies de construction en Asie et en conséquence le béton autoplaçant été employé pour la réalisation de plusieurs structures comme des ponts, tunnels, bâtiments, etc **[7].**

Avantages techniques :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de forme plus complexe. **[9]**

Avantages socio-économiques :

- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant :

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages. **[9]**

### I.3.2 Définition

De nombreux termes définissent ce béton : béton auto-nivelant, béton auto-compactant (SCC en anglais), ou béton hyper fluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton auto-plaçant.

Par béton auto-plaçant on désigne des bétons très fluides, très déformable, homogènes et stables, mis œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectue par le seul effet gravitaire) tout en développant une bonne compacité sans exiger une main d'œuvre spécialisée durant la consolidation, dont le prix devient de plus en plus élevé. Ils épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et étroits ayant un pourcentage élevé d'armatures, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter et conférer à la structure des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique, ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité.

Selon la densité du ferraillage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main d'œuvre considérable et réduit de façon très importante les nuisances sonores **[10].**

La fluidité des bétons autoplaçant est due à une qualité de fine élevée et à l'utilisation des superplastifiants. Ces adjuvants spécifiques issus de technologie moléculaire récente permettent de réduire de manière importante le volume d'eau, tout en conférant au béton autoplaçant une importante fluidité, ils assurent aussi le maintient de l'ouvrabilité du béton durant un temps déterminé. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés agents de viscosité, entre également parfois dans la formulation des BAP qui vont donner une viscosité à la pâte **[11].**

Tout ces adjuvants ont un rôle primordial dans la formulation des BAP, en adéquation avec la formulation des différents composants du béton (quantité importante d'éléments fins, squelette granulaire adapté…) afin d'éviter toute ségrégation. Par conséquent, ce qui distingue essentiellement le béton autoplaçant des autres c'est sa fluidité élevée et la résistance à la ségrégation **[12].**

Les BAP se distinguent donc principalement des bétons dits ordinaires (B.O), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. 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) **[10].**

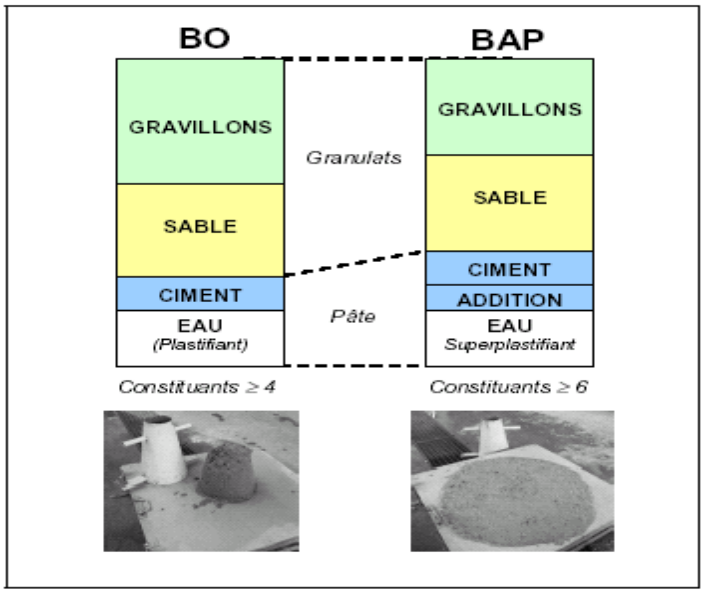



**Figure I.1 :** Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

L'utilisation du béton autoplaçant dans un chantier est une réponse adaptée à plus d'un titre : réponse technique (densité d'armature, remplissage des coffrages complexes), réponse esthétique (qualité de parement, uniformité de teinte) et réponse économique, qu'il s'agisse de délais à respecter ou d'amélioration des conditions de travail. Cette dernière réponse apportée à différentes contraintes de chantier fait du béton autoplaçant un béton considéré comme un béton universel, un béton pour tous **[13].**

### I.3.3 Constituants du béton autoplaçant

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 cette partie, les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (ciment, agrégats, eau, ajouts minéraux et adjuvants), et les paramètres influents **[14]**.

#### I.3.3.1 Ciment

Le ciment est obtenu par cuisson de mélanges de calcaire et d'argile. Le procédé de fabrication consiste à concasser et à broyer ces deux matières premières et à les mélanger dans des proportions bien définies. 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 c'est un 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. Cette phase est propice à la réalisation des tests d'écoulement puisqu'on considère que la structure de la matrice n'est pas modifiée par le processus d'hydratation. Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type de ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton (résistance à la compression, temps de début de prise, 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.

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. Le rapport Eau/Ciment (E/C) est un facteur très influent sur les différents aspects des bétons. Ce rapport a toujours été associé directement à la résistance mécanique du béton et sa durabilité, et la formulation des bétons ordinaires passaient par l'optimisation de ce phénomène. Toutefois, l'introduction de nouveaux matériaux (additions minérales, adjuvants avec un extrait sec solide) porte un intérêt particulier à l'utilisation de la concentration volumique en solides puisque ce paramètre prend en compte tous les constituants du béton **[14]**.




**Figure I.2 :** Résumé du processus de fabrication du ciment **[15]**.

### I.3.3.2 Les granulats

On appelle granulats les matériaux inertes, sable gravier ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons et constituent leur squelette. C'est l'ensemble des grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm **[16]**, et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

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 l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton **[17].**

L'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants a pu être mise en évidence de même qu'il est recommandé d'utiliser des granulats roulés **[18]**. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation car les coefficients de frottements entre les granulats roulés sont plus faibles qu'entre les granulats concassés.

Yurugi et al, rapporté par Khayat **[19]**, considèrent que le volume des gros granulats dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet, ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue.

La taille maximale des granulats est, aussi, un facteur non négligeable, plus la taille maximale des granulats augmente, plus le risque de blocage croit, afin de réduire ce risque il est recommandé de limiter la taille maximale des gros granulats à 20mm **[19]**.

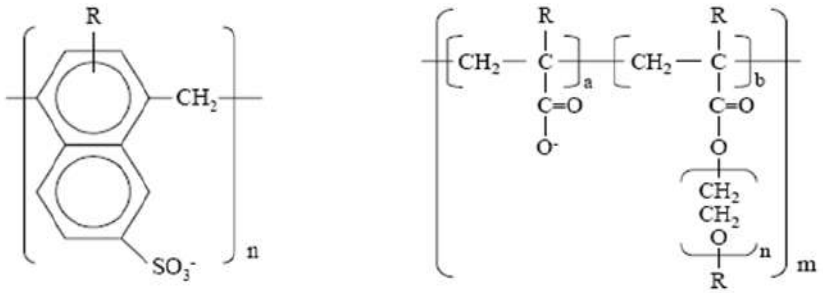
De plus la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu'avec un béton ordinaire, afin de permettre l'écoulement du matériau dans les zones confinées, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 **[18]**.

### I.3.3.3 Les superplastifiants

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.

Un grand nombre de superplastifiant existe sur le marché. Ces adjuvants essentiellement fabriqués pour l'industrie du béton, sont des polymères organiques constitués de groupes hydrophobes et d'autres hydrophiles.

Les superplastifiant sont divisés en familles de produits parmi lesquelles nous citons les principaux : Polynaphtalène sulfonate (PNS), Polymélamine sulfonate (PMS), Lignosulfonates modifiés (LS), Polycarboxylate (PC), Polyacrylate (PA) et Polyoxyéthylène (POE). Les structures chimiques des superplastifiants de la nouvelle génération ne sont pas révélées par les fabricants pour des raisons liées au secret industriel. Toutefois, elles pourraient s'apparenter aux motifs « exemples » de la figure I.3.




**Polynaphtalène sulfonate (PNS)** **Polycarboxylate (PC)**

**Figure I.3 :** Exemples de motifs (R représente H ou un groupe alkyle) **[20].**

Les superplastifiants les plus utilisés étaient les PMS et les PNS, qui sont des polymères anioniques avec des groupes sulfonates est en train de s'éclipser en Europe ; ils contiennent une matière chimique polluante et toxique, le formol. Toutefois, les superplastifiants à base de polycarboxylates (PC), polyacrylates (PA) et polyéthylène (PE), dont l'utilisation est plus récente, s'avèrent très efficaces **[20]**.

### I.3.3.4 Les agents de viscosité

Généralement les superplastifiants diminuent la viscosité du béton, ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux dans lesquels ils sont utilisés (ce rôle peut aller du simple épaississement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP. Si la formule ne contient pas d'agent de viscosité, il est nécessaire d'avoir une plus grande quantité de liant pour assurer un écoulement sans ségrégation.

Les agents de viscosité peuvent être de différentes natures :

- Polysaccharide obtenu par fermentation microbiologique du type gomme welan ou gomme de xanthane ;
- Dérivés cellulosiques à base de méthyle cellulose, d'hydroxy-éthyl cellulose ;
- Colloïde naturel ;
- Suspension des particules siliceuses.

Le mode d'action des agents de viscosité se fait par adsorption des molécules d'eau sur les longues chaînes du polymère induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau et par conséquent celle de la pâte de ciment. SEDRAN (1995) montre que pour un même squelette granulaire, en combinant agent de viscosité et superplastifiant on améliore les propriétés du béton frais et on augmente de façon importante la résistance à la ségrégation et au ressuage **[18]**.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croit avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage en agent de viscosité trop important empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité. Notons également qu'une très forte quantité d'agent de viscosité peut conduire à un entraînement d'air excessif.

Jusqu'à présent, il n'est pas encore possible de fabriquer des superplastifiants qui soient efficaces avec n'importe quel ciment, pour n'importe quel E/C, parce que la vitesse de dissolution des différentes formes de sulfates de calcium que l'on retrouve dans les ciments modernes varie beaucoup trop. Cependant, lorsqu'on fabrique un ciment portland, si on prend en considération l'influence du sulfate de calcium sur la rhéologie des bétons à faible rapport E/L, il est possible d'ajuster la composition du ciment portland pour qu'il devienne parfaitement compatible avec tous les superplastifiants que l'on retrouve sur le marché **[21]**.

### I.3.3.5 Les entraineurs d'air

La résistance des bétons exposés aux cycles de gel-dégel est très reliée à l'existence d'un réseau uniforme des petites bulles d'air d'une taille et situées à une distance bien déterminée, qui agissent comme des réservoirs de sécurité quand l'eau gèle et augmente de volume.

La plupart des agents entraîneurs d'air sont anioniques à cause de la bonne stabilité de l'air entraîné. Ce sont des produits organiques qui, quand ils sont ajoutés à l'eau d'un béton, entraînent une quantité définie d'air, sous forme de bulles microscopiques (90% < 100 µm de diamètre et 60% < 20 µm), ils réduisent la tension à l'interface air-eau, stabilisent l'air formé pendant le malaxage et le fixent au cours du durcissement. Ils ont un groupe polaire (habituellement le groupe carboxylate ou sulfonate) attaché à une chaîne hydrocarbonée.

Un agent entraîneur d'air n'entraîne pas d'air, mais il stabilise l'air piégé pendant le malaxage. Plus la bulle d'air dans le béton est petite, plus grandes sont les pressions d'air à l'intérieur. Ces bulles d'air sont dissoutes à cause de la tension de surface du liquide et elles disparaissent complètement ou grossissent. Quand l'agent entraîneur d'air est ajouté dans le béton, le groupe hydrophile (chargé négativement) s'oriente dans l'eau et le groupe hydrophobe (la chaîne hydrocarbonée) à l'intérieur de la bulle d'air, ce qui forme un film qui baisse la tension de la surface et stabilise les bulles **[22]**. Les molécules d'un agent entraîneur d'air peuvent être adsorbées sur les grains de ciment ou de sable. Dans ce cas, les bulles d'air diminuent les frictions internes, la ségrégation des granulats et le ressuage dans le béton **[22]**.

### I.3.3.6 Eau

L'eau utilisée pour la formulation du béton 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 suspension entre 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, pour cela on utilise l'eau efficace qui consiste à tenir compte de la quantité d'eau existante dans les granulats **[14].**

### I.3.4 Propriétés du béton autoplaçant a l'état frais

Les propriétés du béton frais jouent un rôle majeur dans le domaine des technologies du béton. Par exemple, les caractéristiques du béton à l'état durci dépendent souvent de celles que possédait le béton frais durant son transport, sa mise en place et sa finition.

La fluidité et l'homogénéité (la stabilité) constituent les deux paramètres qui permettent de donner une appréciation sur les caractéristiques du béton à l'état frais. Ces paramètres sont étudiés sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques. Ces critères sont : la capacité au remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité de passage **[23]**.

### I.3.4.1 Capacité au 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 : 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 vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects **[24]**, 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.

Du point de vue rhéologique, la fluidité du BAP se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un superplastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements intergranulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte.

### I.3.4.2 La 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 **[20]**. 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.

### I.3.4.3 La capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de granulats dans le béton (plus de gravier, plus de risques de blocages), et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure I.4 qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

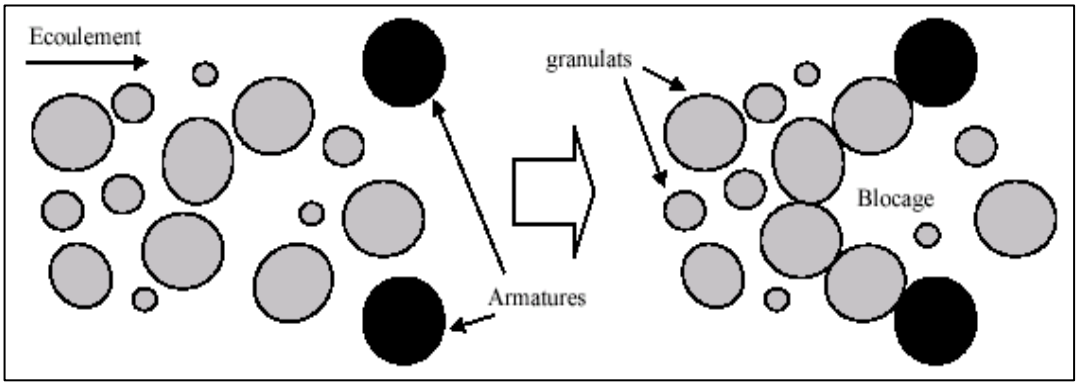



**Figure I.4:** Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.

A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures **[25]**. Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures **[26]**. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent de multiples contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui provoque la formation éventuelle d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement du béton.

L'approche pour réaliser ces propriétés, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage ainsi que la résistance à la ségrégation, est montrée sur la figure I.5, un taux d'agrégats limité augmente le volume de pâte, et par conséquent la quantité de collisions entre les particules des granulats est réduite, ce qui fournis la capacité de passage. Un volume de pâte élevé avec un faible rapport eau/poudre et l'utilisation de superplastifiant assure la fluidité et la résistance à la ségrégation **[27]**.

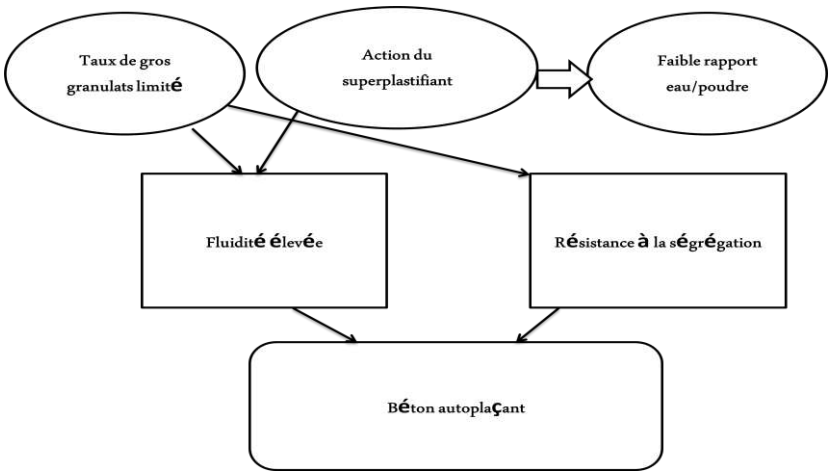



**Figure I.5:** Approche générale pour aboutir à un béton caractère autoplaçant **[28].**

[Ozawa et al, 1991] ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton. Pour des valeurs de l'affaissement plus élevées au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation de ponts de granulats. Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc une déformabilité maximale et une ségrégation minimale.
La figure I.6 montre la relation entre les différentes propriétés du béton autoplaçant **[29]**.

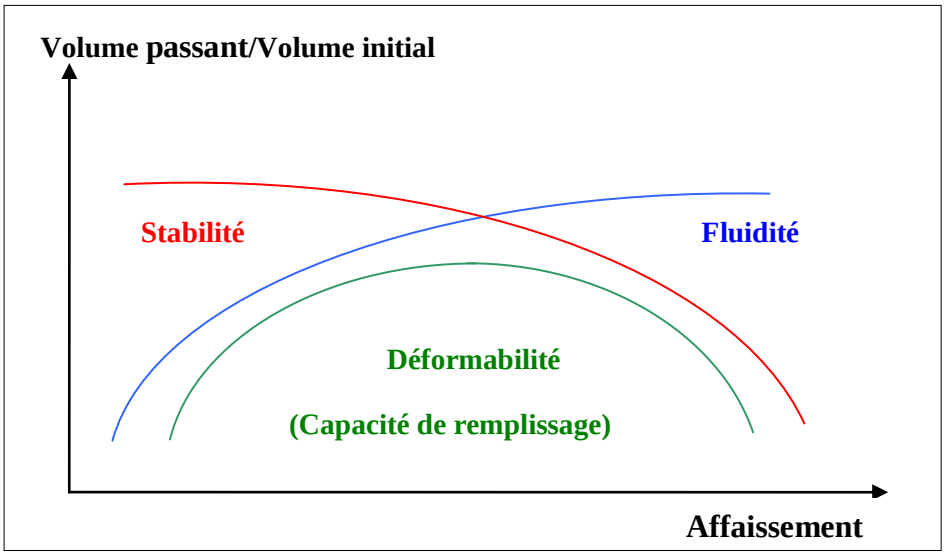



**Figure I.6 :** Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton **[29].**

### I.3.5 Caractérisations des BAP

Les caractéristiques principales des BAP résident dans les propriétés du béton à l'état frais, c'est-à-dire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. La caractérisation de ces propriétés peut être réalisée avec des moyens et un niveau de précision très variables. En effet, il n'existe pas d'essai standard ni de critère associé pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. Pour pallier cette lacune, les chercheurs ont développé différents types d'essais sur mortier et sur béton **[30] [31]**.

### I.3.5.1 Essais sur mortier frais

Des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominants.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celle du BAP lui même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement.

Un seuil de cisaillement entre 20 et 50 Pa et une viscosité plastique entre 6 et 12 Pa.s ont été suggérés comme appropriés **[30] [31]**.

La mesure du seuil de cisaillement et de viscosité plastique nécessitent un rhéomètre, dans le cas ou cet appareil est non disponible, des essais alternatifs plus simples sont proposés pour évaluer la fluidité du mortier comme l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs (Figures I.7 et I.8) **[30]**.

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur plaque en verre, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu.

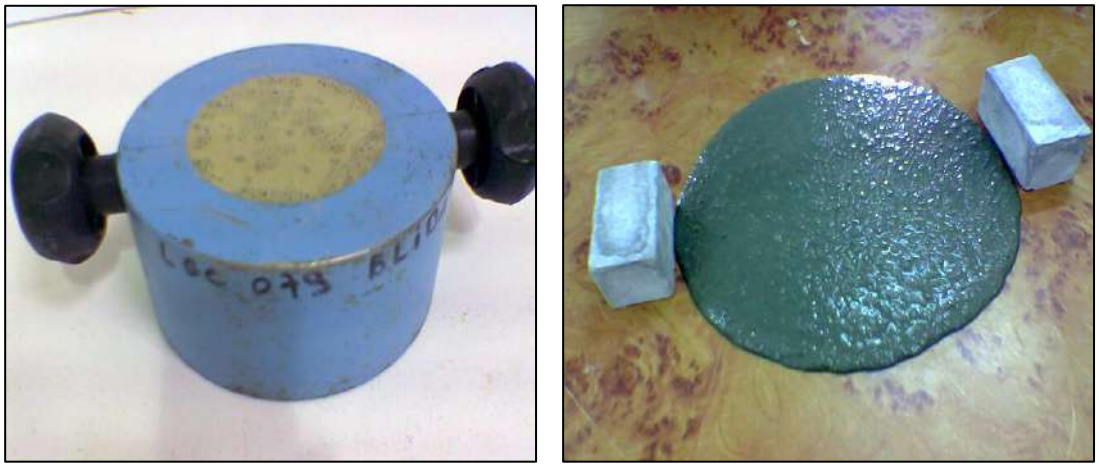


**Figure I.7 :** Essai d'Etalement pour mortier.

Dans l'essai de l'entonnoir (V-funnel), l'entonnoir est rempli de 1.1 litre de mortier, et un temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir.





**Figure I.8 :** Essai à l'Entonnoir pour mortier.

Nawa et al **[32]**, ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et un temps d'écoulement compris entre 6 et 10s produisent un BAP réussi. Quand à Chai, qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 s **[33].**

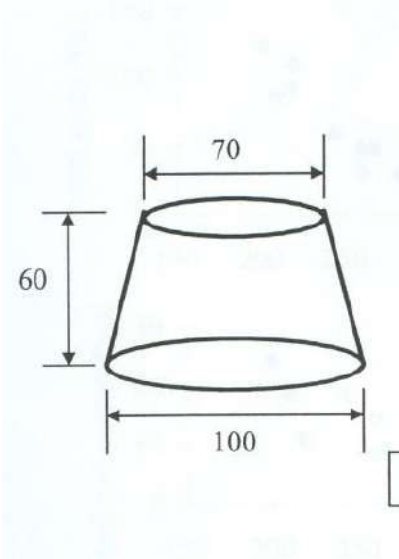



**Figure I.9 :** Essai d'étalement pour les mortiers.

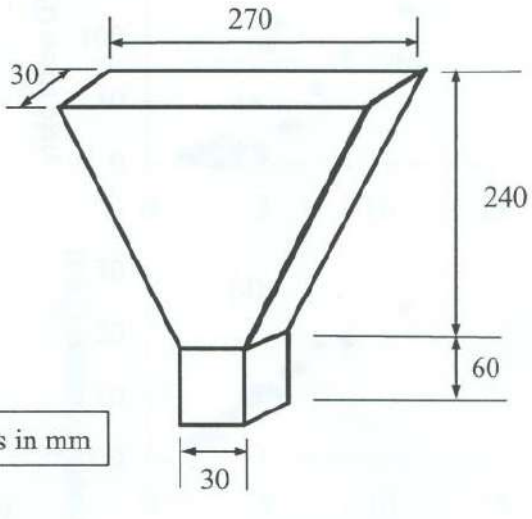



**Figure I.10 :** Essai d'entonnoir pour les mortiers.

### I.3.5.2 Essais sur béton frais

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

#### I.3.5.2.A Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow) :

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car il est très simple à réaliser sur chantier. Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm figure I.11.

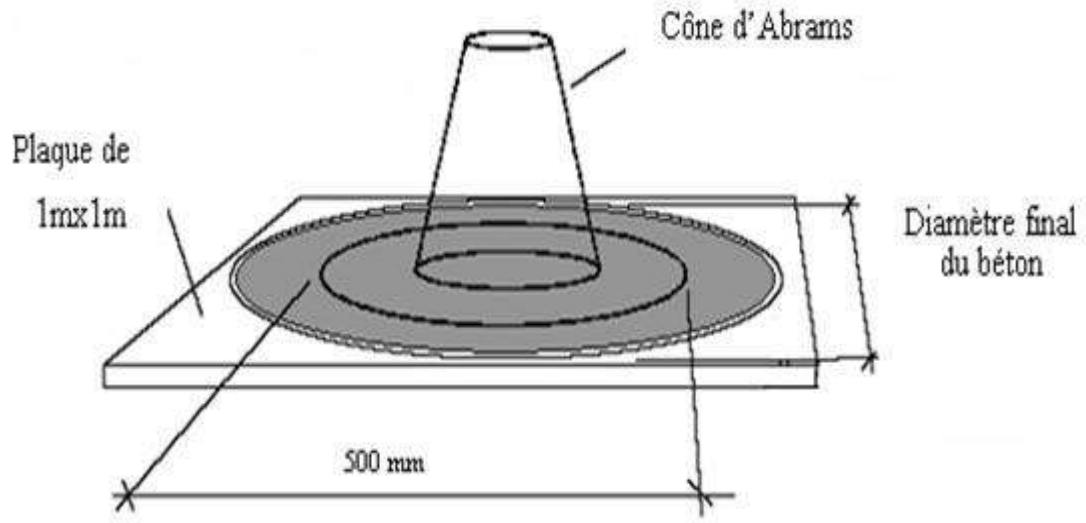



**Figure I.11 :** Essai d'etalement (slump flow).

L'essai consiste à mesurer le diamètre moyen final que prend le béton après le soulèvement vertical du cône, ainsi que le temps au passage de 50 cm. Le diamètre de la galette de béton est le paramètre qui caractérise la fluidité, plus il est grand plus le béton est fluide (capacité de remplissage élevée). L'étalement final d'un béton autoplaçant peut varier entre 50 cm et 80 cm en fonction de l'utilisation du béton **[34]**.

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

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 50 cm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Cette mesure, le $T_{50}$, est une valeur qualitative. En général, des valeurs élevées de $T_{50}$ traduisent un béton de vitesse de déformation faible (viscosité élevée). Toutefois, le $T_{50}$ est une valeur difficile à mesurer, surtout pour le cas des bétons très fluides ; lancer et arrêter le chronomètre au moment où le cône est levé et où le béton passe au diamètre de 50 cm est une estimation subjective. En général un temps de 2 à 5 s est acceptable pour obtenir un BAP **[34]**.

### I.3.5.2.B Essai d'entonnoir (V-funnel) :

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en forme de V " V-funnel " montré dans la figure I.12, ou parfois un entonnoir à section circulaire " O-funnel " montré dans la figure I.13.

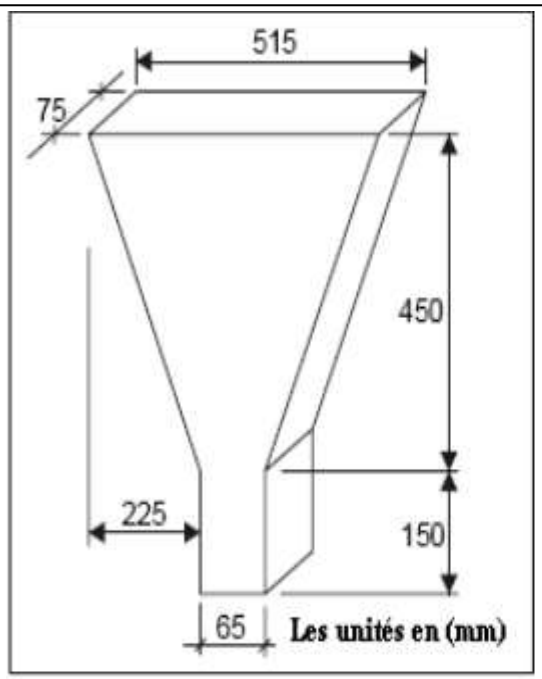



**Figure I.12 :** Essai d'entonnoir « V-funnel»

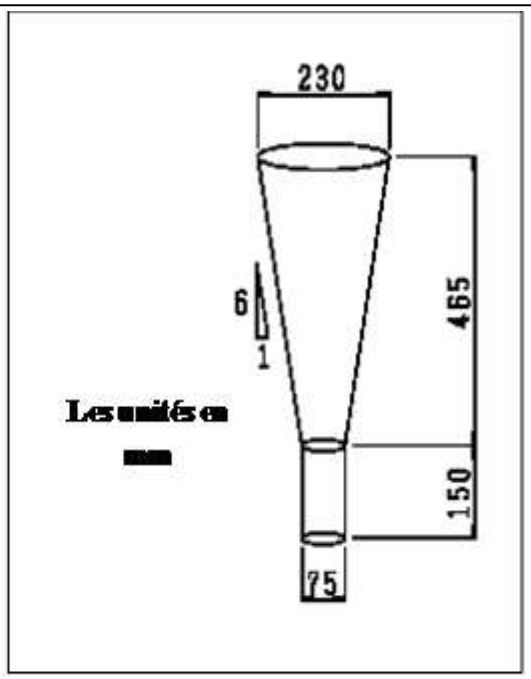



**Figure I.13 :** Essai d'entonnoir « O-funnel»

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

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

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes **[35]**. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante **[35]**

### I.3.5.2.C Essai de la boite en L (L-Box) :

Cet essai permet de tester l'écoulement du béton à travers des armatures (capacité de passage), de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton. L'appareillage représenté par la figure I.14 consiste à laisser passer le béton du compartiment vertical au compartiment horizontal

à travers l'espace entre armatures. Il existe des appareillages de différentes dimensions, ainsi que des armatures de différentes tailles et espacements la figure 1.15 représente une boite en L de hauteur totale de 60 cm, de 70 cm de longueur et de 20 cm de largeur). Un béton autoplaçant possède un taux de remplissage $H_1/H_2$ supérieur ou égal à 0.8 **[35][36]**.

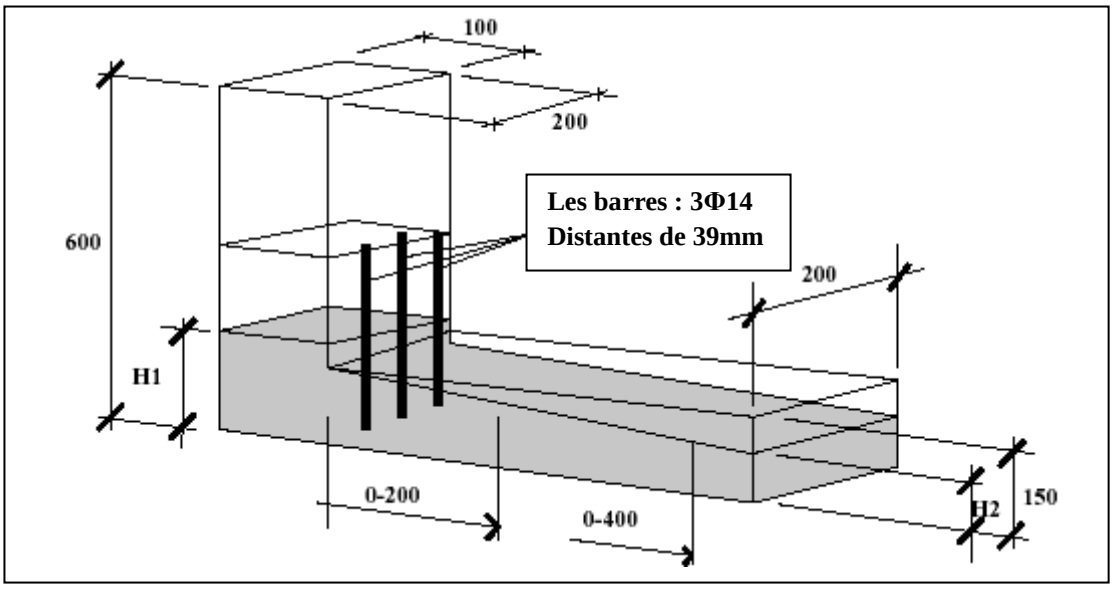



**Figure I.14 :** Schématisation de l'essai de la boite en L (L-Box).

Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation.

La vitesse d'écoulement peut être évaluée en mesurant le temps de passage du béton à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm. Les temps de passages sont respectivement notés $T_{20}$ et $T_{40}$. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1.5 secondes pour $T_{20}$ et inférieures à 3.5 secondes pour $T_{40}$ afin de rester dans un domaine autoplaçant **[35]**.

### I.3.5.2.D Essai de la couronne J (J-Ring) :

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abram. L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams figure I.15 sont centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures.

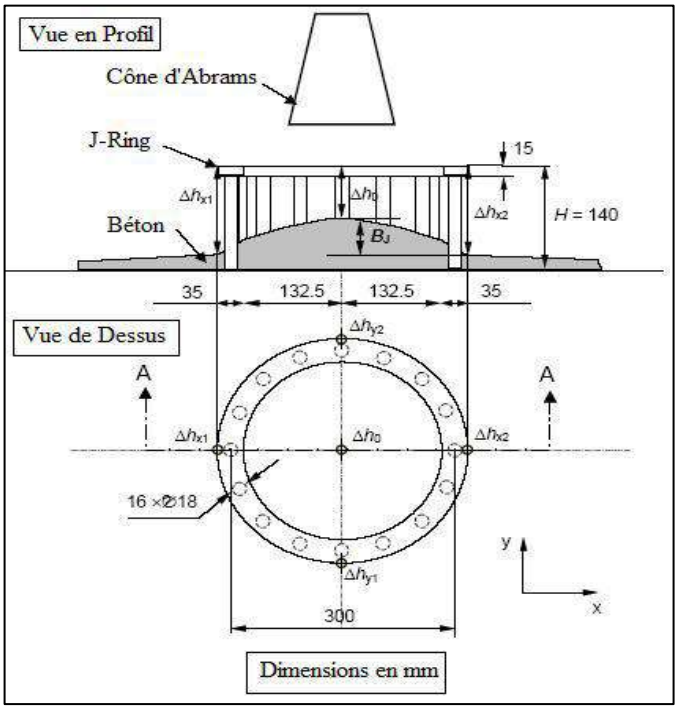



**Figure I.15 :** Essai J-Ring

Les dimensions de l'anneau, des armatures et les espacements entre les armatures sont différentes selon les auteurs et les pays. Nous citons quelques dimensions rapportées par **[35] [37]** : les diamètres des armatures et les espacements entre armatures peuvent varier respectivement dans les plages 10-16 mm et 34-48 mm. Le diamètre de l'anneau varie entre 23.5 et 30 cm.

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la deuxième fois en utilisant l'anneau d'armatures.

### I.3.5.2.E Essai de l'écoulement au tube en U (U-Box) :

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boite en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai figure I.16 est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante.

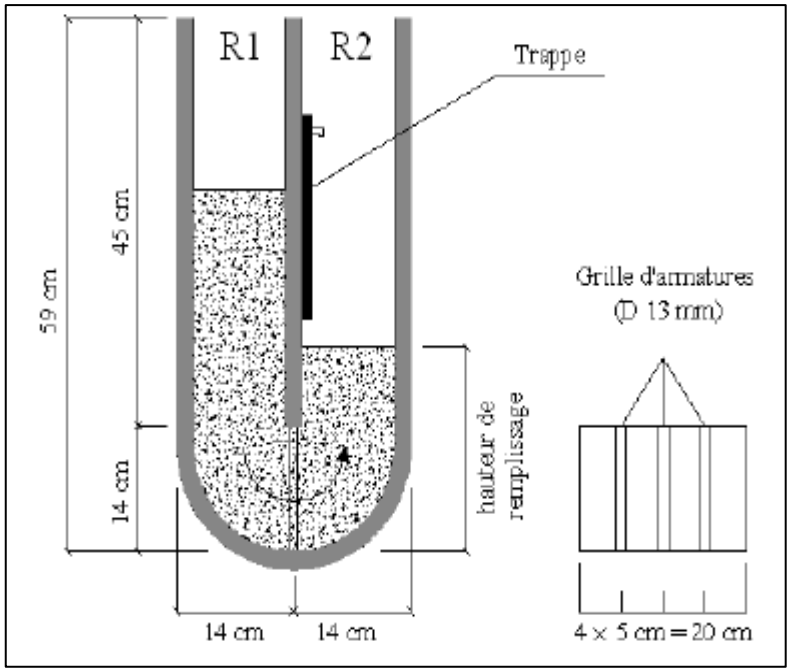



**Figure I.16 :** Schématisation de l'essai du tube en U.

Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays). Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour le béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm **[29]**.

### I.3.5.2.F Essai de l'écoulement au caisson :

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferraillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu figure I.17. Il est généralement destiné au test des bétons très fluides, ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton.

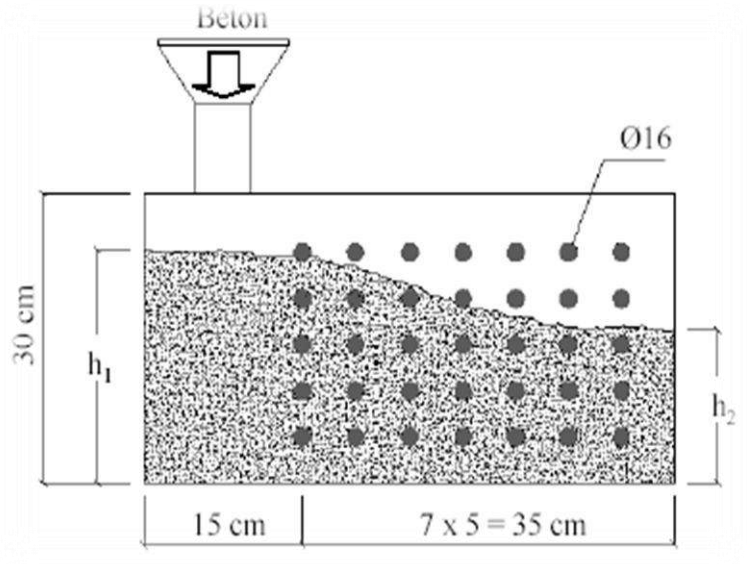



**Figure I.17 :** Schématisation de l'essai du caisson.

Ce test consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur $h_1$ des armatures supérieures figure 1.20. Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage. Une caractérisation quantitative du taux de remplissage R (%) est possible par la relation suivante **[26]** :

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

Où $h_1$ et $h_2$ sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson figure 1.18. Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% **[26]**.

### I.3.5.2.G Essai de la passoire :

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

Le test figure I.18 est réalisé avec un volume de 30 litres de béton, versé dans le récipient équipé dans sa partie inférieure de la grille d'armature. Le récipient est soulevé verticalement laissant le béton s'écouler à travers la grille. Une pression est exercée sur la surface supérieure de l'échantillon de béton afin de tester son comportement à différentes conditions d'écoulement (pression supérieure à celle de l'écoulement à l'essai au caisson) **[26]**.

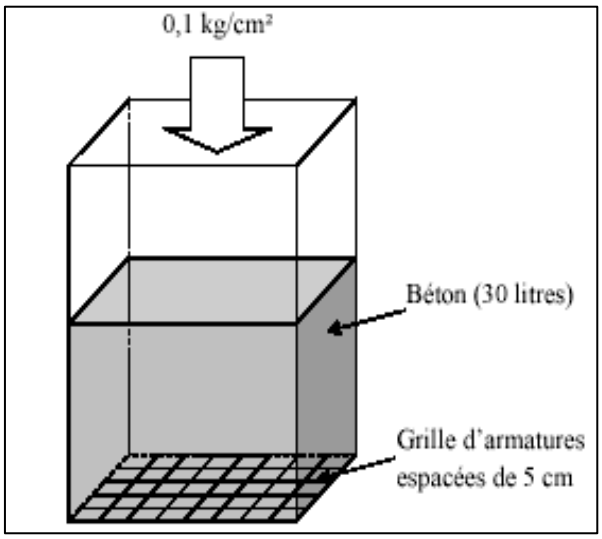



**Figure I.18 :** Schématisation de l'essai de la passoire

### I.3.5.2.H Essai de stabilité au tamis :

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai nécessite un seau de 10 litres avec couvercle, un tamis de 5 mm de maille, de diamètre 315 mm et un fond figure I.19. Le test consiste à remplir le seau de 10 litres et à laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton (4,8 kg ± 0,2 kg) et versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de poser la masse de la laitance traversant le tamis **[36]**.

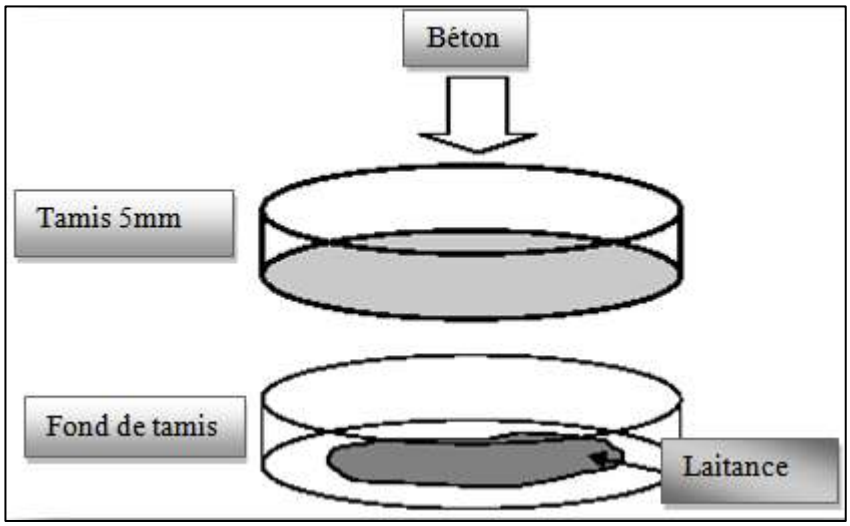



**Figure I.19 :** Schématisation de l'essai de stabilité au tamis.

Le pourcentage P de la laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donc calculé [AFG00] :

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

La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante tableau I.1 **[40]**.

**Tableau I.1 :** Critères de stabilité.

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

### I.3.5.2.9 Essai de la colonne :

Cet essai permet d'évaluer la résistance à la ségrégation d'un béton. Il consiste à placer le béton dans une colonne cylindrique figure I.20 ou à base carrée (10 cm de côté) et à le laisser jusqu'au début de prise. Des fractions des parties supérieures, centrales et inférieures sont lavées au travers d'un tamis de 5 mm et les granulats de taille supérieure à 5 mm sont pesés.

La ségrégation est négligeable si la distribution des granulats dans les différentes parties est uniforme. La distribution est considérée comme uniforme si la différence entre les teneurs en gravier des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10% **[38]**.d'autres auteurs considèrent une valeur de 5% pour le béton autoplaçant **[39]**.

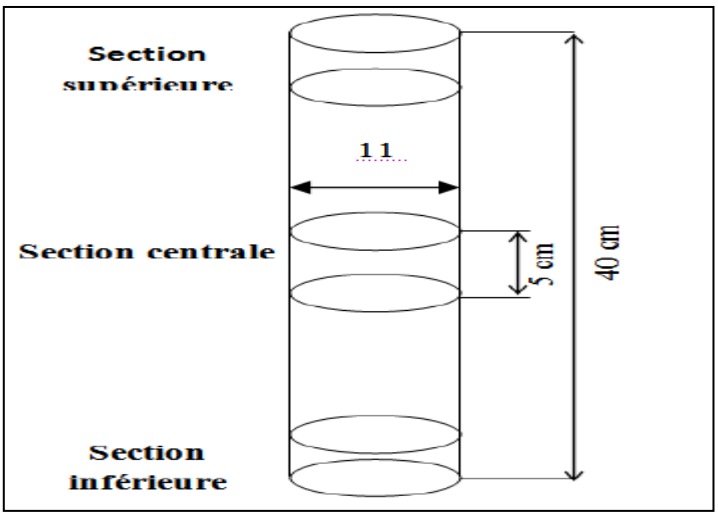



**Figure I.20 :** Essai de la colonne.

### I.3.5.2.I Essai à la colonne LMDC :

C'est un essai qui permet de quantifier la ségrégation statique d'un béton autoplaçant à l'état frais. Le dispositif d'essai est constitué de 7 tiroirs en Bakélite, de section 15 cmx15cm, empilables les uns sur les autres pour former une colonne de 70 cm de hauteur. L'individualisation de chacun de ces tiroirs est possible par l'intermédiaire de tôles coulissantes figure I.21. Il est alors possible de faire une analyse granulométrique du béton contenu dans chacun des tiroirs **[20] [40]**.

Le béton est versé dans la colonne dès la fin du malaxage. A l'échéance de 30 minutes après la mise en place dans la colonne, les tôles figure I.21sont poussées pour séparer les 7 parties depuis le tiroir supérieur jusqu'au tiroir inférieur. Après lavage (sur un tamis de 2.5mm), une analyse granulométrique (à sec) est effectuée sur les squelettes granulaires récupérés dans chaque tiroir.

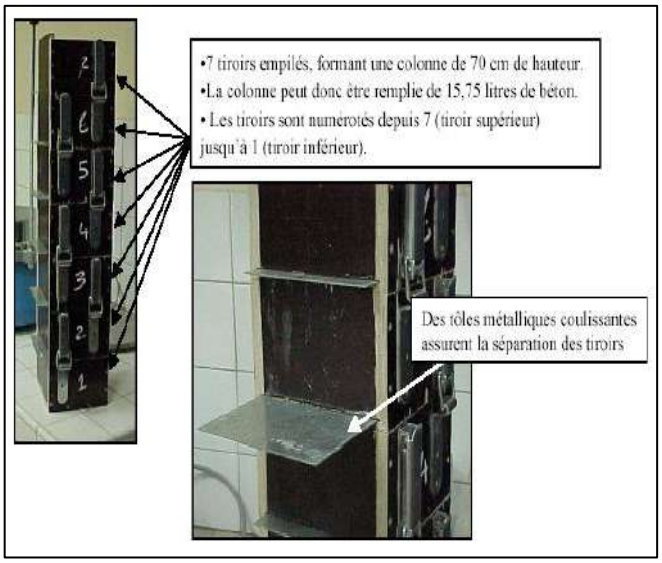



**Figure I.21 :** Dispositif de l'essai à la colonne LMDC.

Cet essai est très bien corrélé avec l'essai de stabilité au tamis, et le complète. En effet il permet d'observer si la différence de granulométrie entre les parties supérieure et inférieure est graduelle ou brusque. De plus, on peut observer si l'éventuelle ségrégation se manifeste à partir d'une tranche granulaire donnée **[20]**.

### I.3.5.2.J Test de pénétration :

L'essai de pénétration à la bille figure I.22 est un essai qui a pour objectif de tester la tendance à la ségrégation.

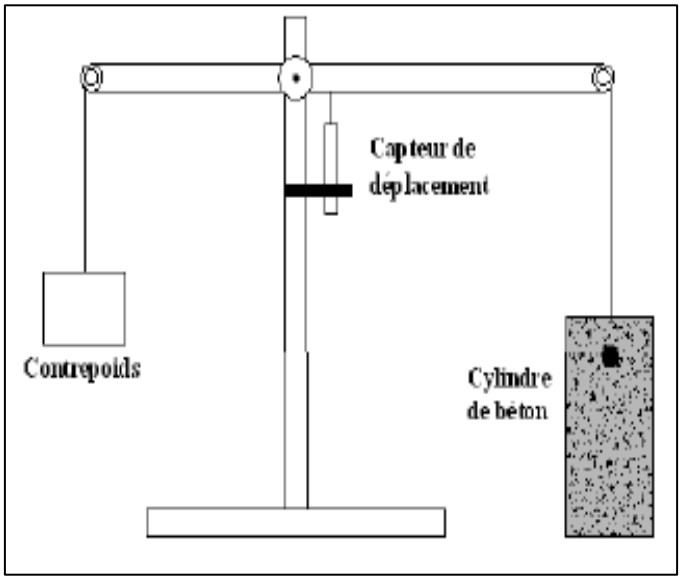



**Figure I.22 :** Essai à la bille.

Il consiste à mesurer l'enfoncement d'une bille de 20 mm de diamètre, dans un cylindre de béton de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. La bille, qui simule un granulat de la même taille, est reliée par une tige rigide au balancier et sa masse volumique est peut être ajustée par un contre poids **[26]**. Pour différents poids apparents, l'essai consiste à laisser la bille s'enfoncer de sa hauteur dans le béton. On mesure le temps nécessaire pour que la bille s'enfonce dans le béton. Plus ce temps est faible, plus la tendance à la ségrégation du béton est élevée. Pour un béton autoplaçant, la résistance à la ségrégation est jugée satisfaisante si la bille s'enfonce d'une hauteur inférieure à 6 cm.

**I.3.5.2.K Essai de ressuage :**

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure I.23 l'eau qui ressue de l'échantillon de béton est libérée dans le perchloréthylène. Comme l'eau a une densité inférieure à celle du perchloréthylène, elle remonte à la surface dans la colonne graduée où il est alors possible d'en évaluer le volume **[36]**. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

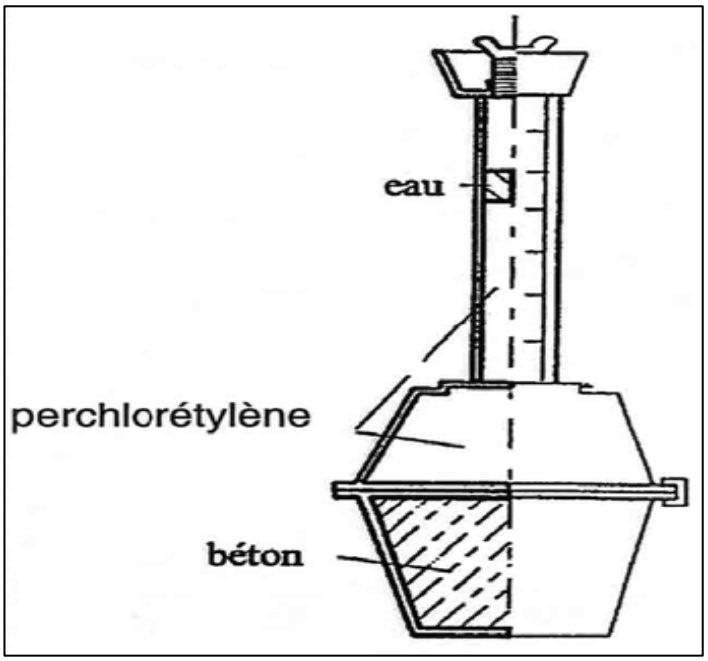



**Figure I.23 :** Essai de ressuage.

### I.3.5.3 Essais sur béton durci

#### I.3.5.3.1 Méthode des ultrasons

Il est possible de déterminer, à l'aide des ultrasons, la variation de la densité du béton selon la hauteur. En effet, le mortier et les granulats ne transmettent pas le son à la même vitesse, du moins dans les premiers jours du béton. A titre indicatif, le mortier d'un béton de un (01) jour permet une vitesse de son d'environ 3,2 km/s, alors qu'à 5-7 jours, cette vitesse est de 4,2 km/s. Dans les granulats, le son voyage habituellement à environ 5 km/s. ces différences peuvent donc servir à évaluer la quantité de granulats en fonction de la hauteur **[41]**.

La procédure expérimentale consiste à confectionner trois éprouvettes normalisées (150 x 300 mm) et, selon la consistance du béton, à vibrer la première pendant un laps de temps déterminé t, une deuxième à un temps t + 2 minutes et la dernière à un temps t + 5 minutes. On teste ensuite le béton à un jour au plus tôt et à 7 jours au plus tard. L'émetteur et le récepteur d'ultrasons devront avoir avec le béton une plus petite surface de contact possible, afin de bien épouser la forme arrondie de l'éprouvette. La fréquence utilisée est habituellement de 50 hrtz. Les essais se font à tous les 2 à 4 cm.




**Figure I.24 :** Appareil ultrasons.

Cette méthode consiste à compte la répartition des granulats d'une certaine dimension en fonction de la hauteur d'un échantillon de béton durci scié longitudinalement. Cette méthode est fastidieuse, mais c'est la plus précise. Cette méthode est très utile pour vérifier la validité d'un autre essai visant à déterminer plus rapidement la résistance à la ségrégation d'un béton.

Une façon plus rapide de compter les granulats a été mise au point par Khayat. Un logiciel d'analyse d'images permet, en effet, de réaliser le comptage des granulats. Il faut cependant, pouvoir bien distinguer les granulats du mortier qui l'entoure ; il faut que la différence soit assez marquée pour que le logiciel puisse mettre les granulats d'une couleur et le mortier, d'une autre.

#### I.3.5.3.2 Méthode des rayons gamma (d'après Popovics, 1973) (cité par **[42]**)

Cette méthode consiste à mesurer l'uniformité de la distribution des gros granulats dans le mortier à l'aide des rayons gamma. En émettant des rayons gamma d'un côté de l'échantillon, il est possible de connaître la concentration en gros granulats selon l'intensité de rayonnement reçue de l'autre côté de l'échantillon. Il faut répéter cette opération en plusieurs endroits sur l'éprouvette de béton pour arriver à obtenir une bonne image de la résistance à la ségrégation d'un tel béton. Cette méthode peut également être utilisée sur des structures existantes.

### I.3.5.4 Propriétés des BAP à l'état durci

#### I.3.5.4.1 Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition **[43].** Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats. Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

##### I.3.5.4.1.1 Résistance mécanique

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 MPa au 28$^{ème}$ jour) **[45]**. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **[44]**. 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. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours.

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. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique **[44]**. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

#### I.3.5.4.1.2 Module d'élasticité

Pour des rapports gravier sur sable G/S similaires, le module d'élasticité des bétons autoplaçants (BAP) est équivalent à celui des bétons vibrés (BO). Par ailleurs, pour des rapports G/S différents, le module d'élasticité des BAP est inférieur à celui des BO. Ceci est expliqué par le fait que le volume de pâte est plus important pour les bétons autoplaçants. En effet, le module de la matrice du béton est compris entre 6000 et 25000 MPa, alors que celui des granulats (non légers) Eg se situe entre 60000 et 100000 MPa. Pour les bétons réalisés avec des granulats classiques, le module de la matrice est donc environ 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats **[24,46]**. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats) **[24,46]**.

#### I.3.5.4.1.3 Retrait

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

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

Juste après le coulage, le béton est un mélange de particules solides, d'eau et d'air en suspension. Etant donné les différences de masse volumique, les grains de ciment et les granulats ont tendance à ségréger et contraignent l'eau et les bulles d'air à percoler vers la surface. Ce phénomène, appelé ressuage, engendre une couche d'eau superficielle et un tassement de la matrice cimentaire figure I.25.

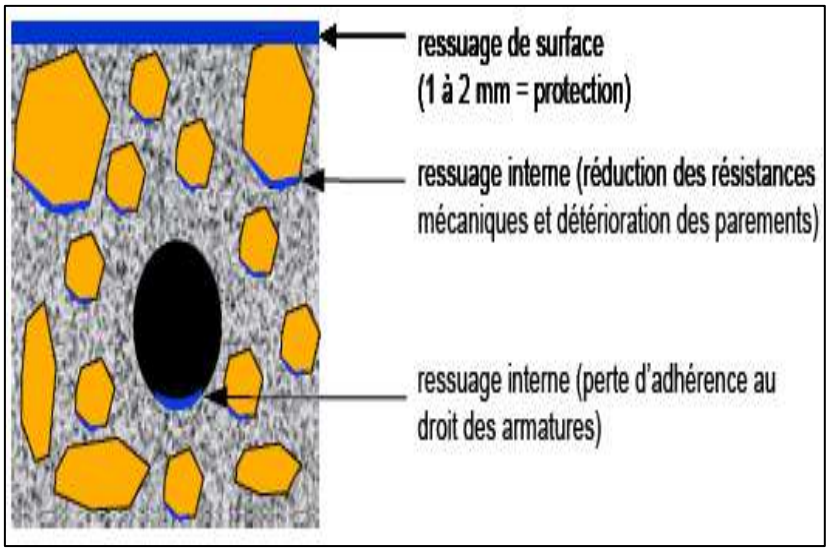



**Figure I.25 :** Phénomène de ressuage.

**a- Le Retrait Thermique (plastique) :**

Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante. A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de refroidissement. Contrairement aux variations de température, il n'y a donc pas réversibilité

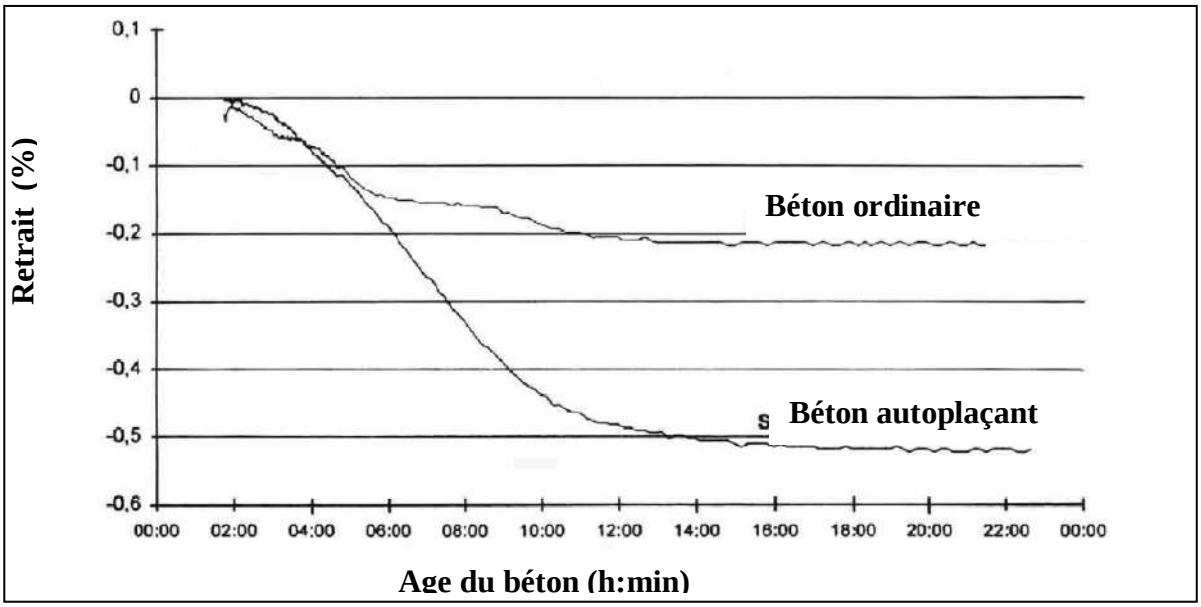



**Figure I.26 :** Retrait plastique de BAP et de béton vibré de structure (T=20°C, 50% HR).

des contraintes engendrées par un empêchement des déformations. Il en résulte une contrainte de traction résiduelle, pouvant mener à la fissuration du béton **[13,47]**.

**b- Le Retrait Endogène ou d'Autodessiccation :**

L'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique **[48]**.

**c- Le Retrait de Séchage ou de Dessiccation :**

Est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant **[46]**.

**d- Le Retrait de Carbonatation :**

À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation, s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer, on parle de faïençage. À la vue du volume de pâte plus important, les BAP sont susceptibles d'être plus déformables que les bétons ordinaires. Les données de la littérature dans ce domaine montrent bien une tendance d'un retrait total plus important pour les BAP.

Comme leur retrait endogène varie entre 180 et 250 μm/m, il semble être inférieur ou égal à celui des bétons ordinaires, leur retrait de séchage est donc plus élevé (environ 800 μm/m).

Ce retrait de séchage est d'autant plus important que le rapport E/C est grand mais paraît d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé **[46]**.

### I.3.5.4.2 Propriétés physicochimiques et durabilités

La plupart des processus de détérioration touchant les structures en béton, impliquent les transferts de matière (en particulier d'agents agressifs) à l'intérieur d'un matériau poreux comme le béton. Il est couramment prétendu que meilleure est la résistance d'un béton à ces transferts, plus durable sera celui-ci. Les propriétés de transfert du béton sont donc utilisées progressivement comme critère de sa durabilité. La pénétration de gaz, d'eau ou d'autres fluides dans le béton s'effectue par l'intermédiaire des pores de la matrice cimentaire et des interfaces pâte - granulats. Les trois principaux mécanismes des transferts de fluides à l'intérieur du béton sont la perméabilité, la diffusion et l'absorption. La perméabilité concerne le transfert de matière dû à un gradient de pression.

La diffusion est le mécanisme par lequel un fluide se déplace sous l'action d'un gradient de concentration et l'absorption est le résultat de différence de tension de surface dans les capillaires.

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlore, absorption d'eau et carbonatation accélérée) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO). La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée. Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlore et d'absorption d'eau par capillarité. Et toujours à résistance équivalente, le taux de carbonatation des deux types de béton reste comparable. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires **[48]**.

#### I.3.5.4.2.1 Perméabilité aux gaz

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété : la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton.

Certaines études publiées **[49]** ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'auréole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés. D'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité des ces bétons.

D'autres résultats **[50]** relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés, figure 1.27. Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales dans les BAP.

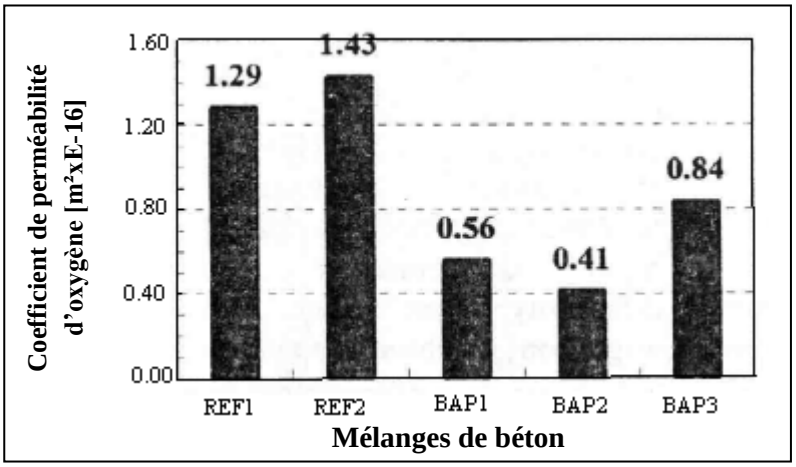



**Figure I.27 :** Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP et deux bétons vibrés correspondants **[37].**

### I.3.5.4.2.2 Migration des chlorures :

Certains auteurs ont évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10-12 m²/s au lieu de 15 à 18.10-12 m²/s, figure I.29. Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire **[50]**.

D'après Zhu **[50]**, la résistance à la pénétration des ions chlore est très influencée par le type d'additions minérales employées dans le béton. Les bétons formulés avec (BAP1) ou sans filler calcaire (BAP3 et béton vibré REF1) présentent des coefficients de migration des ions chlore similaires, avec une valeur légèrement plus faible pour celui formulé avec un filler calcaire figure I.28. Ces auteurs indiquent également que l'emploi de cendres volantes diminue considérablement le coefficient de migration de ces bétons.

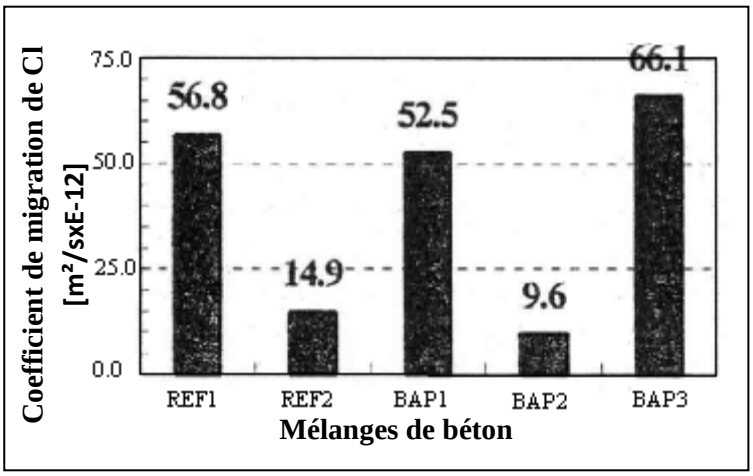



**Figure I.28 :** Coefficient de migration des ions de chlore de trois BAP et de deux bétons vibrés correspondants **[50].**

### I.3.5.5 La formulation des bétons autoplaçants :

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence.

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

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

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.

L'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant 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 du 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/$m^3$.
- La masse de ciment est en général de 300 à 350 kg/$m^3$. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/$m^3$.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage de saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développé 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.

De multiples approches ont été développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant, ces diverses méthodes de formulation ont en commun des principes et des conditions qui sont **[12]** :

1. Augmenter la déformabilité de pâte :
   - En utilisant un superplastifiant (agent fortement réducteur d'eau) ;
   - En équilibrant la teneur en eau et en poudre.
2. Réduire les frictions entre les granulats :
   - En limitant le volume des gros agrégats (et en augmentant le volume de pâte) ;
   - En utilisant une granulométrie de poudre continue.
3. Réduire la séparation des solides :
   - En limitant le volume d'agrégats ;
   - En diminuant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant un agent de viscosité.

4. Minimiser le ressuage (eau libre) :
   - En réduisant la quantité d'eau ;
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant des poudres possédant une bonne surface spécifique ;
   - En augmentant la teneur en agent de viscosité.
5. Améliorer la cohésion pour réduire la ségrégation durant l'écoulement :
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant un agent de cohésion.
6. Espacer les barres en fonction du volume et de la taille maximale des agrégats :
   - En diminuant le volume de gros agrégats ;
   - En réduisant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant des agrégats de forme ronde.

#### I.3.5.5.1 Formulation par la méthode générale

Cette formulation proposée en 1993 par l'équipe du professeur OKAMURA **[51]** émane de l'idée selon laquelle seul un ciment portland à faible chaleur d'hydratation ou un ciment portland riche en bélite est susceptible de générer des matériaux poudreux. Fort de ce principe, on peut donc s'attendre, une fois l'autocompactibilité obtenue, à ce que le béton durci atteigne lui aussi les performances recherchées. Pour tenir compte des variations qui peuvent se produire dans le processus de fabrication (quantité des matières, erreurs de pesages, etc.), on fixe au préalable une exigence d'autocompactibilité légèrement plus sévère que la valeur théoriquement nécessaire. La formulation comporte en fait cinq étapes **[52]** :

La quantité d'air (A) est choisie en fonction de la résistance au gel-dégel. Avec $G_{lim}$, qui est le volume absolu d'un $m^3$ de gros agrégats, le volume de gros agrégats ($G$) est évalué selon la formule :

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

Le volume de fins agrégats (S) représente 40% du volume de mortier, soit :

$$S = \frac{40}{100}\frac{(1 - A - G)}{1 - K_{sf}} \qquad \textbf{(I.4)}$$

où $K_{sf}$ représente le taux de fines particules (<0.09mm) dans le sable.

Le rapport volumique Eau/Poudres est déterminé par deux tests sur mortier. Le premier est un test d'écoulement avec un petit cône, le second est une mesure du temps de passage à travers un entonnoir.

La fluidité du mortier est donnée par :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \qquad \textbf{(I.5)}$$

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

La viscosité du mortier est donnée par :

$$T = \frac{10}{t} \qquad \textbf{(I.6)}$$

avec $t$ le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en secondes.

L'obtention simultanée d'un paramètre d'écoulement de 5 et d'un paramètre de temps de passage de 1 conditionne la formulation Okamura.

Le dosage en superplastifiant est évalué par rapport à la masse de poudre et à la teneur en eau, à l'aide des tests sur mortier. Cependant, le dosage pour le béton devra être ajusté (énergie de malaxage différente, etc.) en fonction de tests spécifiques. De manière semblable aux deux tests appliqués sur le mortier, l'essai d'étalement et l'essai d'entonnoir, adaptés au béton évaluent ses aptitudes à la déformation. L'étalement doit se situer entre 65 et 85 cm, et le temps de passage doit être compris entre 10 et 15 secondes **[51]**.

Ces tests sur béton permettent de dissocier l'action d'un ajout d'eau de celle d'un ajout de superplastifiant. L'eau abaisse considérablement la cohésion du mélange et diminue le temps d'écoulement dans l'entonnoir, sans améliorer sensiblement l'étalement. Le superplastifiant diminue légèrement le temps d'écoulement en entonnoir et améliore nettement l'étalement.

### I.3.5.5.2 Formulation JSCE

La démarche proposée en 1998 par la *Japanese Society of Civil Engineers* (JSCE) est fondée sur des travaux de recherche et des applications pratiques **[52]**. Dans cette formulation, la quantité d'eau, le rapport eau/poudres et la teneur en poudre varient en fonction de l'utilisation ou non d'un agent de cohésion. Les points principaux de cette formulation sont **[51]** :

- Le volume absolu des gros agrégats varie en fonction de l'autocompactibilité désirée. Il est situé entre 0.30et 0.32 $m^3/m^3$ et le diamètre maximum est limité à 20, voire 25mm.

- Quand un agent de viscosité est utilisé, la quantité d'eau se situe idéalement sous les 180 $kg/m^3$ dans les conditions d'exposition normales. Si la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, et uniquement dans ce cas, il peut être utilisé jusqu'à 190 kg d'eau par $m^3$. En absence d'agents de viscosité, la quantité d'eau doit être située entre 155 et 175 $kg/m^3$.

- Les rapports eau/poudres et eau/liant sont basés sur les performances du béton à l'état durci. Si la fluidité n'est pas atteinte, on peut utiliser davantage de liant. Sans agent de viscosité, le rapport eau/poudres se situe entre 28 et 37% en masse et entre 85 et 115% en volume.

- Les quantités de liant et de poudres sont déduites des rapports précédents. Avec un agent de viscosité de type polysaccharide, les poudres représentent en généra l0.13$m^3/m^3$. Dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 $m^3/m^3$.

- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.

- La quantité de fins agrégats se déduit des quantités précédentes (gros agrégats, poudres, eau et air).

- Le dosage de superplastifiant et d'agent de viscosité est évalué selon l'expérience. Le dosage de superplastifiant dépend cependant du rapport eau/poudres et de la nature des poudres. Il est généralement situé, pour les superplastifiants de nouvelle génération, entre 1 et 2 kg d'extrait par $m^3$, ce qui correspond, pour une solution aqueuse à 35%, à une quantité de 3 à 6 litres. Le dosage en agent de viscosité est très variable selon la nature de l'agent et le type de béton (avec ou sans ajout de fines) : de 0.15 à 0.30% de la quantité d'eau pour les agents cellulosiques, de 3 à 5% pour les acryliques, de 2 à 3% pour les glycols, de l'ordre de 0.05% pour les polysaccharides solubles.

### I.3.5.5.3 Formulation par minimisation du volume de pate (CBI méthode ou méthode SUEDOISE)

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide (granulats) et une phase liquide (pâte = eau + liant + adjuvants). Les auteurs supposent que la phase liquide joue deux rôles dans un BAP. D'abord, elle fluidifie le matériau en limitant les frottements entre les granulats. Elle écarte ensuite suffisamment les gravillons pour éviter la formation de voûtes contre les armatures, responsable d'un éventuel blocage de l'écoulement les auteurs font de plus l'hypothèse qu'il existe un volume minimum de pâte permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. Ils proposent les deux critères suivants **[52] :**

**a- Critère de fluidité :**

Le volume minimum de pâte nécessaire pour fluidifier 1m$^3$ de béton s'écrit :

$$V_{f\,\min} = 1 - \frac{\left(1 - V_{vide}\right)}{C_e} \qquad \textbf{(I.7)}$$

où $V_{vide}$ est la porosité (m$^3$/m$^3$) du mélange de sable et de gravillon.

$C_e$ est un coefficient « d'écartement ». Lorsqu'il vaut 1, $V_{f\,min}$ est égal à $V_{vide}$ : le volume de pâte remplit la porosité des granulats. Lorsque $C_e$ est supérieur à 1, la pâte comble la porosité et écarte les granulats. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$C_e = \left( \frac{e_{\min}}{D_{moyen}} + 1 \right)^3 \qquad \textbf{(I.8)}$$

et

$$D_{moyen} = \frac{\sum \left( m_i \times d_i \right)}{\sum m_i} \qquad \textbf{(I.9)}$$

Où $D_{moyen}$ est le diamètre moyen des granulats (mm) ; $d_i$ est le diamètre du tamis $i$ (mm) ; $m_i$ est la masse de granulats sur le tamis $i$ (kg) ; $e_{min}$ est la distance moyenne minimale entre les granulats pour fluidifier le béton (mm).

La détermination de $e_{min}$ se fait de manière expérimentale. Des bétons avec des volumes de pâte décroissants sont confectionnés ; on considère que le volume limite de fluidité est atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, on obtient des courbes donnant la distance $e_{min}$ en fonction de $D_{moyen}$ pour différents rapports massiques eau/fines (E(C+F)) et pour différents diamètres maximaux du gravillon. On notera que les auteurs n'ont choisi que trois paramètres pour décrire $e_{min}$ (E(C+F), $D_{moyen}$, $D_{max}$) au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle.

**b- Critère de non-blocage :**

Les auteurs ont proposé une approche d'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L. Ils ont fait l'hypothèse que le phénomène de blocage était indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide.

L'expression du risque de blocage $R_b$ s'écrit :

$$R_b = \left(1 - V_p\right) \sum_i \frac{V_i}{V_{crit,i}} \qquad \textbf{(I.10)}$$

$V_i$ : proportion volumique de grains de taille *di* rapportée au volume de granulat ;

*Vp*: proportion volumique de la pâte dans le béton ;

$V_{crit,i}$ : fraction en volume en grain de taille *i* induisant un blocage.

De cette relation on peut déduire pour chaque rapport gravillon sur sable la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage en écrivant $R_b$=1 (en fait, le risque de blocage a lieu si $R_b$ est inférieur ou égal à 1).

Le choix du G/S pourrait se faire de manière arbitraire en posant par exemple G/S=1. Du point de vue économique, il serait préférable de prendre un rapport G/S le plus faible possible pour limiter la quantité de liant. On sait cependant qu'un béton fortement dosé en sable entraîne plus d'air, d'où la préférence de choisir un mélange sable gravillon avec porosité minimale.

### I.3.5.5.4 Méthode Française (LCPC) :

Au LCPC (laboratoire central des ponts et chaussée), un modèle mathématique a été développé par De Larrard et al en 1994, 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 **[52]** :

- 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 :

- 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 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 la seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

### I.3.5.6 Fabrication des BAP

Il est clair que les formules de BAP sont en général plus pointues que celles des bétons ordinaires et qu'il faut mettre en œuvre des précautions et contrôle particuliers. Ces moyens spécifiques portent à la fois sur la maîtrise des constituants, le niveau d'équipement de la centrale et les procédures de fabrication.

La fabrication du BAP doit faire l'objet d'une procédure particulière, définissant :

- Les dispositions de contrôle des constituants,
- Les dispositions visant à maîtriser la teneur en eau du béton,
- La séquence de malaxage (ordre d'introduction, temporisation et temps de malaxage),
- La fourchette d'étalement acceptable et les variations de dosage en eau correspondantes,
- Les contrôles sur le béton frais.

Les points suivants doivent être soigneusement étudiés :

- L'étalonnage doit être réalisé pour chaque formule de manière à définir le plus précisément possible pour obtenir un béton homogène.
- L'introduction des constituants doit faire l'objet d'une optimisation en fonction du matériel de fabrication de la centrale.
- Les contrôles sur béton frais doivent être définis de manière à assurer la régularité de la production.

Dans le cas de béton fourni par une centrale prêt à l'emploi, l'équipement et le fonctionnement de la centrale doivent être vérifiés périodiquement.

Il est à noter que certaines expériences positives ont été réalisées, après avoir défini et validé par des essais de convenance la procédure correspondante, avec une adjuvantation du béton sur chantier c'est-à-dire une transformation d'un béton primaire de composition adaptée (d'ouvrabilité contrôlable à l'essai au cône d'Abrams) en BAP.

Cette procédure requiert un contrôle poussé sur les points suivants :

- Ouvrabilité du béton primaire (sur chaque camion),
- Etat des pales du camion malaxeur,
- Temps de malaxage en toupie,
- Homogénéité du béton après fluidification (par mesure d'étalement),
- Traçabilité de l'ajout d'adjuvant.

Il n'est pas acceptable de devoir attendre un laps de temps après la fabrication du béton pour obtenir la conformité de ce dernier. En particulier en terme de stabilité. En effet, il est impossible de contrôler la régularité de la production si le béton n'est pas homogène et de ce fait ne peut être échantillonné correctement **[14]**.

### I.3.5.7 Mise en œuvre des BAP :

Il existe plusieurs méthodes de mettre en œuvre les bétons autoplaçants (BAP) **[20]** :

- Une première méthode, traditionnelle et commune aux bétons ordinaires, consiste à mettre en place le béton par le haut du coffrage, au moyen d'une goulotte par exemple. Toutefois, le principal inconvénient lié à ce mode de mise en œuvre est sa propension à aggraver ou même à générer les phénomènes de ségrégation du béton frais dus à sa chute dans les coffrages. Les BAP sont moins sensibles à ce type de ségrégation que les bétons classiques. Ainsi, d'après les résultats d'essai existant, il convient de limiter la hauteur de chute des BAP à une valeur maximale de 5 m (valeur préconisée par le TC SCC de la RILEM). Pour l'optimisation de la quantité d'aspect des parements, cette hauteur de chute est toutefois à limiter au maximum.
- Une seconde méthode, similaire à celle utilisée pour le bétonnage de pieux, consiste à introduire un tube plongeur par le dessus du coffrage. Cette méthode s'applique aux éléments verticaux et présente l'intérêt d'éviter la chute du béton frais dans les coffrages.
- Une troisième méthode consiste à mettre en place le béton à la pompe par le bas des coffrages. Cette méthode, qui s'applique également aux éléments verticaux, évite la chute du béton dans le coffrage, limite le personnel de chantier à la personne chargée de contrôler la pompe et permet d'envisager des bétonnages sur grande hauteur.



**Figure I.29 :** Méthode de mise en place du BAP sur chantier.

Quelque soit la méthode retenue pour mettre en place le béton frais, il convient de limiter la longueur de cheminement horizontale dans les coffrages. Pour un même béton autoplaçant, la distance admissible de cheminement sera fonction de la capacité du béton à se déplacer dans les coffrages (densité d'armatures, coudes, présence de réservations, etc.) en restant homogène.

D'une manière générale, plus la distance de cheminement devient longue plus le béton est susceptible de se manifester de la ségrégation dynamique. La longueur maximale de cheminement préconisée par le TC SCC de la RILEM est de 10 m **[53]**.

On trouve dans la littérature des données parfois contradictoires sur la poussée exercée par le béton autoplaçant sur les coffrages. Certains auteurs confèrent même au BAP des propriétés thixotropiques à l'état frais qui lui permettent, à condition d'être mis en place par le haut du coffrage, de générer des poussées inférieures à celles données avec des bétons dits classiques **[61]**. Le manque d'expérimentation dans ce domaine ne permet pas aujourd'hui de fixer de règles précises sur ce point. Les entreprises devront être particulièrement vigilantes sur le dimensionnement de leurs coffrages. Il faut retenir, de manière conservatrice, une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Dans le cas d'une mise en place du béton par le bas du coffrage à la pompe, la poussée exercée par le béton frais est assurément au moins de type hydrostatique (effet dynamique lié au pompage).

Le caractère cohésif des bétons autoplaçants ne va pas dans le sens d'une augmentation des pertes de laitance par rapport aux bétons dits classiques. C'est pourquoi, les précautions permettant d'assurer une bonne étanchéité des coffrages vis à vis de pertes éventuelles de laitance par les bétons autoplaçants sont les mêmes que celles actuellement pratiquées par les chantiers pour des bétons fluides classiques.

L'utilisation de ces bétons implique un choix rigoureux du type d'huiles ou de cires de décoffrage afin de limiter les risques de défaut de parement (bullage).

Le faible ressuage des bétons autoplaçants les rend plus vulnérables vis-à-vis des effets du retrait plastique. Cependant cette sensibilité peut être très différente d'une formule de béton à une autre. D'une manière générale, il est recommandé d'être particulièrement vigilant aux moyens de cure à mettre en œuvre après le bétonnage des surfaces horizontales afin d'éviter une évaporation trop importante dans les premières heures après mise en œuvre **[53]**.

## I.4 Bétons de fibres

### I.4.1 Quelques fibres dans le béton

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant quelles soient naturelles ou artificielles. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. Le tableau I.2 représente les différents types de fibres et le tableau I.3 donne leurs principales caractéristiques **[54].**

**Tableau 1.2:** Différents types de fibres.

| Fibres naturelles | | Fibres artificielles | |
|---|---|---|---|
| végétales | animales | minérales | organiques |
| Lin<br>Chanvre<br>Cellulose<br>Sisal<br>coir | Poil<br>Laine<br>soie | Laitiers<br>Carbone<br>Métaux (acier, fonte)<br>Verres spéciaux<br>amiante | Polypropyléne<br>Polyamides<br>polysters |

**Tableau 1.3** : Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées. **[55]**

| Fibres | Diamètre (µm) | Long (mm) | densité | Rt (Mpa) | E ($10^3$ Mpa) | Allongement à La rupture en % | Coeff. De Dilatation (µ/ m) | $R_{feu}$ Temp. Max °C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Acier | 5 – 500 | 20 – 80 | 7.8 | 1000-3000 | 200 | 3-4 | 11 | 1500 |
| Fonte (ruban) | 36 x2600 de section | 50 – 60 | 7.8 | 2500 | 140 | 1 | | 1500 |
| Verre | 5 – 20 | 40 – 70 | 2.6 | 1500-3000 | 80 | 2-3.5 | 9 | 800 |
| Polypropylène | 10 – 200 | 25 – 75 | 0.9 | 400-750 | 5-10 | 15-25 | 90 | 150 |
| Polyester | | | 1.4 | 700-850 | 8 | 11-13 | | |
| Amiante | 0.02 – 20 | 5 | 2.5 – 3.4 | 3000 | 8-15 | 2-3 | 1 | 1500 |
| Carbone | 5 – 9 | Variable | 1.7 – 2 | 2000-3000 | 250-400 | 0.5-1.5 | | 400-1500 |
| sisal | 10 - 50 | 1.50 | 1.5 | | 130 | 3 | | |

Parmi les fibres les plus utilisées dans le domaine du béton, nous citons :

### I.4.1.1 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 de clou)

### I.4.1.2 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.

### I.4.1.3 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.

### I.4.1.4 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 :

- 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.

Les fibres d'acier sont souvent produites sous différentes formes (droites, lisses, ondulées, à crochets etc.). Les fibres d'acier ont fait l'objet de nombreuses recherches pour le développement de leur utilisation dans le béton, en tant que dallages, bétons projetés, éléments préfabriqués, éléments de réparation etc. De par leurs propriétés, les fibres d'acier apportent d'importantes solutions aux matrices fragiles : moindre fissuration au retrait, meilleure ductilité de la structure renforcée etc [**56**]

### I.4.1.5 Les fibres végétales

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétales dans la construction remonte aux années où l'on fabriquait des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis l'année 1970), le premier composite liant avec les fibres végétales était le plâtre. De ce fait, plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales **[57,58]**.

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales **[58,59]**.

#### I.4.1.5.1 Classification des fibres végétales

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

**A. Les Fibres de Feuilles**

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides.

Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, de Henequen et d'abaca **[58]**.

De ces fait, plusieurs chercheurs tel que : NILSSON **[60]**, AYYAR et al **[61]** ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

**B. Les Fibres de Tiges**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes.

Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton.

Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de Sunn, de Kennaf, d'Urena et de chanvre **[62]**. NILSSON **[60]** rapporte que les fibres de tige, les plus utilisées dans le renforcement du ciment, sont celles de sunn, de chanvre et de jute.

**C. Les Fibres de Bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs **[58,63]** ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments.

**D. Les Fibres de Surface**

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le cotton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre **[64]**.

Il est à noter que, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

### I.4.1.5.2 Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs **[64, 65, 65, 60, 66, 67]**.

A titre d'exemple sur le tableau I.4(a) et I.4 (b) nous citons les résultats des chercheurs BLEDZKI et al. **[64]** TOLËDO FILHO et al. **[68]** SAVASTANO et al. **[59]** KRIKER **[63]**, ABBANI **[69]**.BLEDZKI et GASSAN **[64]**, dans leur étude concernant les fibres végétales, ont constaté que la résistance à la traction et le module d'élasticité des fibres végétales sont proportionnelle à leur teneur en cellulose. Ainsi, ils ont remarqué que la résistance dépend de la forme des spirales des filaments (voir figures I.31, I.32, I.33) ils constatent que les fibres à grand angle spiral ont une grande déformabilité, mais une faible résistance, tandis que les fibres à faible angle spirale ont une faible déformabilité et une grande résistance.

A titre d'exemple la figure I.30 schématise une fibre végétale et montre les spirals des filaments des fibres. Tandis que, les figures I.31 et I.32 donnent la variation de la résistance à la traction en fonction de la teneur en cellulose et de l'angle spirale des filaments.

Sur le tableau I.4(a), nous constatons que les fibres végétales sont naturellement humides. Pratiquement elles absorbent des quantités importantes d'eau à la saturation. Nous remarquons sur le tableau I.4 (b) que la densité de ces différentes fibres est très rapprochée, alors que leurs résistances à la traction et leurs modules d'élasticité sont très variable. Cela est dû à la variation de leur composition chimiques et leur texture et spécialement l'orientation de leurs filaments et leur angle spiral.

**Tableau I.4(a)** : Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées.

| Fibre | Diamètre (mm) | Densité ($g/cm^3$) | Teneur en eau à l'état naturel (%) | Absorption d'eau après 5 min (%) | Absorption d'eau à la saturation (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Sisal | - | 1.5 | - | - | - |
| | - | 1.37 | - | 89.30 | 92 |
| | 0.08-0.30 | 0.75-1.07 | 10.97-14.44 | 67-92 | 190-250 |
| Noix de coco | - | 1.2 | - | - | - |
| | - | 1.17 | - | 43.2 | 80.40 |
| | 0.11-0.53 | 0.67-1.00 | 11.44-15.85 | 22-28 | 85-135 |

**Tableau I.4(b)** : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.

| Fibres | Densité ($g/cm^3$) | Allongement à la rupture (%) | Résistance à la traction (Mpa) | Moodule de Young |
|---|---|---|---|---|
| Cotton | 1.5-1.6 | 7.0-8.0 | 587-597 | 5.5-12.5 |
| Jute | 1.3 | 1.5-1.8 | 393-773 | 26.5 |
| Lin | 1.5 | 2.7-3.2 | 345-1035 | 27.6 |
| Chanvre | -- | 1.6 | 690 | -- |
| Ramie | -- | 3.6-3.8 | 400-938 | 61.4-128 |
| Sisal | --<br>1.37<br>0.75-1.07<br>1.5 | 2.6<br>5.2<br>2.08-4.08<br>2.0-2.5 | 278<br>363<br>577.50<br>9.4-22.0 | --<br>15.2<br>10.94-26.70<br>9.4-22.0 |
| Noix de coco | 1.2<br>1.17<br>0.67-1.00<br>1.33 | 30.0<br>37.7<br>13.7-41.0<br>- | 175<br>107<br>174<br>72 | 4.0-6.0<br>2.8<br>2.5-4.5<br>2.0 |
| Palmier dattier | 0.51-1.08 | 7.5-17.4 | 170-290 | 2.1-5.25 |

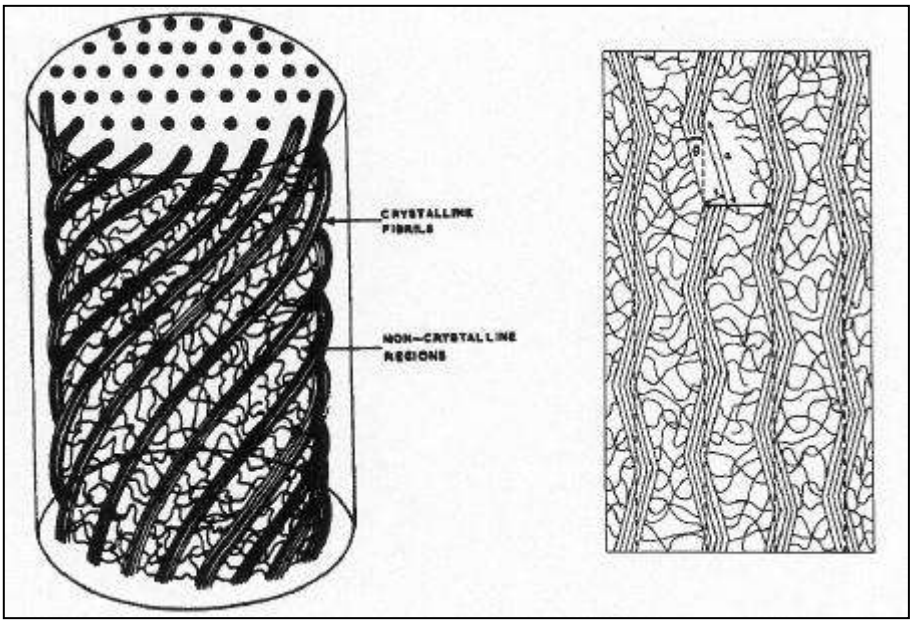



**Figure I.30 :** Schématisation des fibres végétales **[64].**

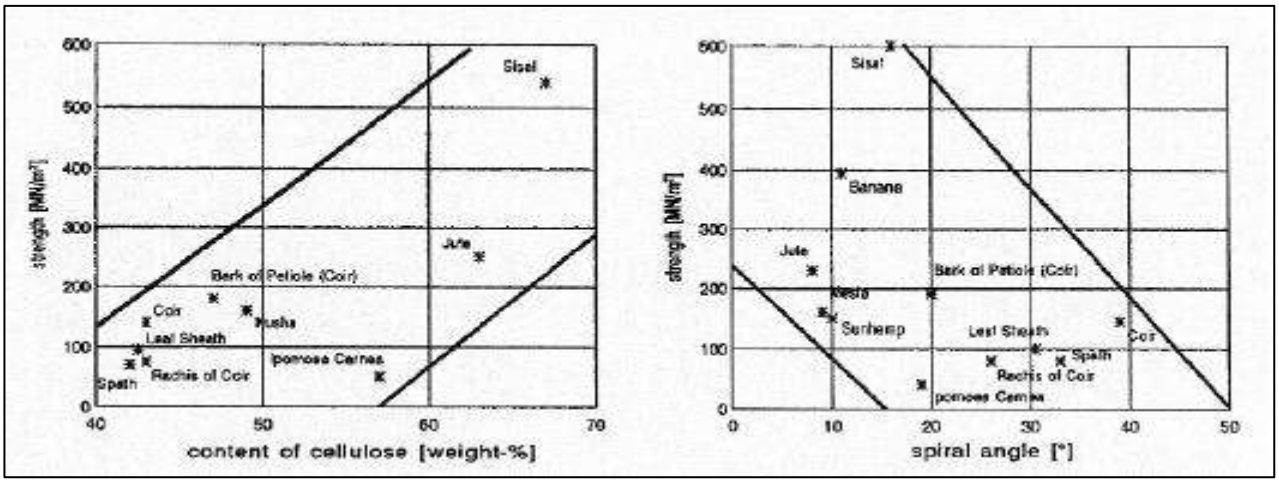



**Figure I.31:** Variation de la résistance en fonction du % de cellulose **[64]**.

**Figure I.32 :** Variation de la résistance en fonction de l'angle spiral **[64]**.

### I.4.1.5.3 Caractéristiques chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique qui influe énormément sur leur durabilité et spécialement dans les milieux alcalins.

La composition chimique des fibres végétales est formée de trois principaux constituants à savoir: la cellulose, l'hémicellulose et la lignine **[64]**.

**A. La Cellulose**

C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose.

**B. Hémicellulose**

L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres, est un polysaccharide à chaîne courte ramifiée et repliée sur elle même. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres et qui permet aux parois de s'allonger pendant la croissance.

**C. Lignine**

La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel provenant de la copolymérisation de trois alcools phénylpropènoïques.

Le tableau I.5 présente la composition chimique de quelques fibres végétales (noix de coco, sisal, jute et palmier dattier) reproduit selon **[63,70]**

**Tableau I.5:** Composition chimique de quelques fibres végétales **[63,70].**

| Fibres | Composition (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Cendre | Cellulose | Hémicellulose | Lignine |
| Noix de coco | 1.44 | 32-43 | 0.15-0.25 | 40-45 |
| Sisal | 1.13 | 66-72 | 12.0 | 10-14 |
| Jute | 7.6 | 63 | -- | -- |
| Palmier dattier | 1.2 | 41-45 | 6-10 | 30-40 |

### I.4.2 Formulation des bétons de fibres

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué durant ces dernières années. Tout d'abord, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres, sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments. Ensuite on s'est intéressé à un nombre croissant de propriétés d'usage du matériau en relation avec la totalité de son cycle de vie (depuis son comportement rhéologique à l'état frais jusqu'à sa durabilité dans différentes ambiances). Enfin, la gamme des propriétés que l'on peut atteindre avec les moyens industriels modernes s'est singulièrement élargie, on rappellera que les deux aspects communément étudiés dans une formulation de béton, à savoir la maniabilité et la résistance en compression. On sait aujourd'hui formuler des bétons secs (d'affaissement nul) comme des bétons auto compactant ou auto nivelant. De même, toute une gamme de résistances a été explorée allant de 1 à 2 MPa, pour des matériaux ré excavables destinés au remplissage de tranchées, à des résistances très élevées qui peuvent être supérieures à 200 MPa pour des mortiers à ultra haute résistance destinés à la fabrication de conteneurs de déchets radio actifs, par exemple.

En résumé, le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables et de dimensions tout en tenant compte que l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste. L'approche scientifique du béton s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues :

- l'empilement sec dont on cherche à prévoir la compacité et la ségrégabilité

- l'empilement humide (béton frais) intéressant par ses propriétés rhéologiques

-l'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une matrice de pâte de ciment durcie. [**71**]. On peut ainsi définir la formulation comme :

**Tableau I.6** : Définition de la formulation.

<table>
<tr><td colspan="3">Formulation classique d’un béton</td></tr>
<tr><td colspan="2">Maniabilité</td><td>Résistance à la compression</td></tr>
<tr><td colspan="3">Problème actuel de la formulation des bétons</td></tr>
<tr><td>Davantage de variables</td><td>Espace de recherche beaucoup plus grand</td><td>Davantage de dimensions</td></tr>
<tr><td colspan="3">Approche scientifique du béton</td></tr>
<tr><td colspan="3">Analyse de la structure granulaire</td></tr>
<tr><td colspan="3">Trois étapes parcourues</td></tr>
<tr><td>L’empilement sec : compacité et ségrégabilité</td><td>L’empilement humide (béton frais) : propriétés rhéologique</td><td>L’empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une pate de ciment durci</td></tr>
</table>

La formulation de béton a tenu compte de l’application des trois hypothèses fondamentales de cette méthode (BARON – LESAGE) **[72]** donne :

- E/C fixé au départ : le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire le plus compact.
- Les proportions optimales en granulats ne dépendent pas de la nature et du volume du liant
- L’introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

On se doit d’établir au préalable :

- Le rapport eau–liant.
- Le diamètre du plus gros granulat.
- La géométrie et les dimensions de la fibre.
- Le pourcentage des fibres.
- La maniabilité souhaitée.
- La variation du rapport massique S / S+G avec la maniabilité correspondante : si la maniabilité voulue n’est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un super plastifiant.

### I.4.3 Propriétés des bétons de fibres

#### I.4.3.1 Propriétés mécaniques

##### I.4.3.1.1 Résistance à la compression

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

Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : celui en premier de maintenir les fissures ce qui favorable pour la phase post pic, et celui en second de créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

##### I.4.3.1.2 Résistance à la traction directe

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux.
D'après la bibliographie, les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées, et bien sûr au béton témoin retenu.

Donc on constate que pour tous les BF, les résistances à la compression est inférieures ou à peu près égale à celle du béton de référence. Ceci confirme que les fibres métalliques n'interviennent pas d'une manière significative sur le comportement à l'échelle du matériau. Nous pouvons résumer ces résultats de la manière suivante :

- la quantité de sable et de pâte de ciment étant plus importante dans les BF que dans les bétons sans fibres la porosité de ces BF est également plus importante.

Par conséquent si l'on se réfère à la loi de FERET, on en déduit une chute logique des résistances l'ajout de fibres dans la matrice perturbe notablement celle-ci en y introduisant des vides (effets de voûte, effets de parois)

Dans les BF, il y a moins de gros graviers que dans les bétons sans fibres, et il semblerait que ceux-ci jouent un rôle non négligeable dans la résistance du béton [**73**]

#### I.4.3.1.3 Résistance à la flexion

Le renforcement par des fibres est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire. En flexion, contrairement a ce qui est généralement observé en traction directe avec ce type de fibres, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure. Un peu comme en béton armé classique, la déformation de flexion s'accompagne du développement d'une fissuration et du déplacement vers le haut de l'axe neutre

**[73]**.

#### I.4.3.1.4 Résistance à la fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture. Ainsi d'une manière très générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent inférieures à la limite d'élasticité, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois.

La résistance à la fatigue des éléments en béton est conditionnée par de nombreux facteurs :

- en particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques qui peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une structure.

- Une distinction est généralement faite entre une fatigue avec un cycle à basse fréquence, mais un niveau de contrainte élevé et une fatigue à haute fréquence mais à un niveau de contrainte faible.

Ceci correspond à deux types d'étude, par exemple d'une part le séisme et d'autre part l'action du vent et des vagues. Bien que la distinction entre les deux types de chargement ne soit pas très précise, conventionnellement 1000 à 10000 cycles sont choisis comme limite entre les deux types de chargement **[73]**.

### I.4.3.2 Fissuration du béton de fibre

## A. Sous actions mécaniques

La réponse mécanique du composite est liée au processus de fissuration qui se développe. Les fibres ont deux rôles : d'une part elles sont susceptibles de retarder l'apparition de la macro fissuration de la matrice et d'autre part elles réalisent une couture sur les lèvres de la macro fissure formée dans l'éprouvette ; ce qui apporte de la ductilité au matériau.

Durant la première phase, la microfissuration se répartit uniformément dans le volume. Le matériau peut être caractérisé par une loi comportementale. Enfin pour augmenter la résistance à la fissuration il semble logique d'utiliser un fort pourcentage de fibres courtes.

Durant la deuxième phase, le développement de la macro fissure est fortement dépendant des conditions aux limites du corps d'épreuve. Des fibres longues bien ancrées et ductiles offriront une meilleure résistance à l'ouverture des fissures **[1]**.

## B. Causes d'apparition des fissures

L'apparition de fissures dans les structures en béton est un phénomène courant et difficilement évitable, source d'inconvénients voire de litiges ainsi qu'il en ressort des expertises auxquelles elles donnent souvent lieu. Les fissures peuvent apparaître de différentes manières :

- les fissures précoces : elles apparaissent sur le béton frais immédiatement ou quelques heures seulement après le bétonnage. Elles sont dues au tassement du béton frais partiellement empêché par la présence des fibres et au retrait plastique qui correspond à une déshydratation du béton frais sous les effets combinés de la température extérieure et du climat.

- Les fissures d'origine mécanique : elles apparaissent sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci (quelques mois ou années après la construction), ces fissures sont la conséquence de l'apparition de sollicitations excédant la capacité de déformation du béton ou sa résistance à la traction et sont dues à des déformations ou des charges imposées à l'ouvrage.

- Les fissures d'origine physico-chimiques apparaissent quelques années après la construction, elles sont la conséquence des phénomènes de gonflement ou de réactions chimiques (corrosion des fibres, réactions alcali– granulats), ou à des efforts physiques (gel de l'eau dans les pores du béton) qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement d'enrobage **[1]**.

## I.5 BAP renforcé de fibres végétales

Dans cette partie, nous s'intéresse à étudier l'influence de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des BAP afin d'établir les avantages et les inconvénients de la valorisation des déchets en carton dans les BAP.

Il a introduit quatre types obtenus à partir du recyclage des papiers notée respectivement FbA, FbB, FbC, et FbD, ont été introduites dans les formulations de référence de la pate. Leurs différentes propriétés géométriques et leur teneur en cellulose sont présentés dans le tableau I.7 **[74]**.

**Tableau I.7 :** Propriétés physiques des fibres **[74]**.

| Fibre | Cellulose (%) | L (µm) | d (µm) | L/d | Densité (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| FbA | 80 | 1100 | 45 | 24.4 | 30 |
| FbB | 50 | 1000 | 45 | 22.2 | 70 |
| FbC | 90 | 250 | 35 | 7.1 | 135 |
| FbD | 90 | 150 | 35 | 4.3 | 15 |

### I.5.1 La formulation BAP renforcé de fibres végétales

La quantité des différents constituants du mélange doit être calculée en volume. On calcule ainsi le volume relatif qu'occupe chaque constituant dans un mètre cube de béton autoplaçant. Cette part s'obtient en divisant la masse de chacun des constituants par sa masse volumique.

$$V_t = \frac{M_G}{\rho_G} + \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_F}{\rho_F} + \frac{M_{adj}}{\rho_{adj}} + \frac{M_{Fb}}{\rho_{Fb}} + \frac{M_{Eau}}{\rho_{Eau}} = 1m^3 \quad \textbf{(I.11)}$$

On doit en tenir compte pour le calcul de l'eau efficace totale la quantité d'eau absorbée par les fibres. Ainsi $E_{eff\ tot} = E_{eff} + E_{satFb}$ avec $\frac{E_{eff}}{L} = 0.35$ La composition BAP-MFS fibrés est suivante :

C =350 kg/m$^3$, F = 116kg/m$^3$, E = 164 kg/m$^3$, et $E_{eff\ tot} = E_{eff} + E_{satFb}$ avec $\frac{E_{eff}}{L} = 0.35$.

Trois dosages de fibres A ont été introduits $V_f$ = 10%, 15% et 20%. Les dosages des fibres sont calculés par rapport au volume du liant (L = C + F). Les corrections sur le dosage en eau ont été faites pour tenir compte de la taille et de l'humidité des granulats ainsi de l'eau contenue dans le superplastifiant.

On ne tiendra pas compte dans ce calcul de l'air occlus (en principe, de 1% à 3% pour le béton autoplaçant, dans notre cas l'air est approximativement égal à 1.7%). La formulation et le choix des constituants du BAP résultent des mêmes exigences sur béton frais et sur béton durcis.

Pour étudier l'influence des fibres végétales sur l'ouvrabilité (Slump flow), la stabilité et la résistance à la ségrégation du BAP fibrés, 10 compositions différentes ont été effectuées.

Les plages de dosages en superplastifiant pour les BAP fibrés, représentent les dosages nécessaires pour satisfaire la condition de consistance en matière d'étalement :

*Etalement* = $D_{moyen} = 65^{\pm 2cm}$ **[74]**.

**Tableau I.8 :** Résultats récapitulatifs des différents essais de caractérisation du BAP fibrés 'FbA'.

BAP fibrés témoins

| | | | | Résultats de slump | | | | Résultats de L-Box | | | | Résultats de J-Ring | | | Résultats de stabilité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Eau (L)** | **Fibre (%)** | **Sp (%)** | **BAP testé** | **$T_{500}$ (s)** | **$D_1$ (cm)** | **$D_2$ (cm)** | **$D_{moy}$ (cm)** | **$H_1$ (cm)** | **$H_2$ (cm)** | **$H_2/H_1$ (%)** | **$t_v$ (min)** | **$H_{int}$ (cm)** | **$H_{ext}$ (cm)** | **$D_{moy}$ (cm)** | **π (%)** |
| 184.00 | 10.00 | 1.35 | 1 | 7 | 71 | 71 | 71.5 | 12 | 10.5 | 87.5 | 1.45 | 1.5 | 0.8 | 69.5 | 5.645 |
| 184.00 | 10.00 | 1.15 | 2 | 6 | 68 | 66.5 | 67.25 | 15 | 11 | 73 | 1.3 | 2.5 | 1.2 | 62.5 | 3.812 |
| 184.00 | 10.00 | 1.20 | 3 | 7 | 69 | 70 | 69.5 | 12 | 10 | 83 | 1.26 | 1.5 | 1 | 67.5 | 6.770 |
| 194.00 | 15.00 | 1.15 | 5 | 11 | 61.5 | 64 | 62.75 | 19 | 11.5 | 60 | 1.41 | 3.2 | 1.5 | 56.5 | 1.729 |
| 194.00 | 15.00 | 1.20 | 6 | 9 | 64 | 66 | 65 | 16 | 10.5 | 65 | 1.36 | 3 | 1.8 | 59 | 3.645 |
| 194.00 | 15.00 | 1.25 | 7 | 7 | 69 | 67 | 68 | 13.5 | 10 | 74 | 1.34 | 2.5 | 1 | 64.5 | 4.687 |
| 204.00 | 20.00 | 1.25 | 8 | 6 | 65 | 64 | 64.5 | 17.5 | 11 | 62 | 1.31 | 3.4 | 1.7 | 59 | 1.958 |
| 204.00 | 20.00 | 1.35 | 9 | 7 | 66 | 65 | 65.5 | 15 | 11 | 73 | 1.38 | 3 | 1.5 | 62 | 3.354 |
| 204.00 | 20.00 | 1.40 | 10 | 6 | 68 | 66 | 67 | 14.5 | 12 | 82 | 1.34 | 2.8 | 1.5 | 64 | 3.583 |

### I.5.2 Les propriétés des BAP de fibres végétales à l'état frais

#### I.5.2.1 Ouvrabilité

Le dosage en superplastifiant qui permet de satisfaire la condition de consistance imposée (*Etalement* = D $_{moyen}$ = $65^{\pm 2cm}$) a été déterminé en effectuant des essais au cône d'Abrams sur les 22 compositions de BAP fibrés (Figure I.33) **[74].**

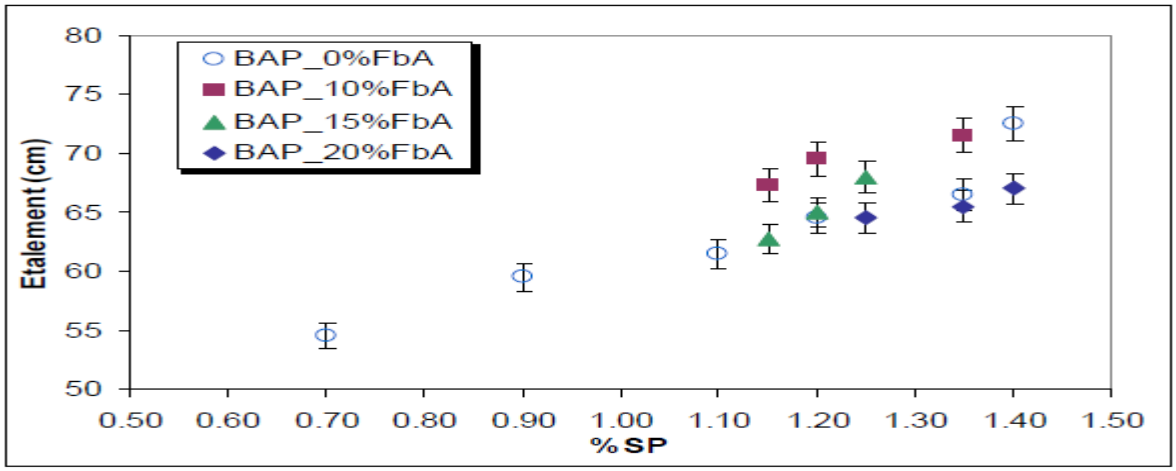



**Figure I.33 :** Courbe d'étalement de BAP additionnés de FbA **[74]**.

Les dosages optimaux pour chaque composition sont résumés dans le tableau I.9.

**Tableau I.9 :** Dosages optimaux de BAP fibrés **[74]**.

| Dosage | BAP-0% FbA | BAP-10% FbA | BAP-15%FbA | BAP-20% FbA |
|---|---|---|---|---|
| (Sp) $_{optimal}$ | 1.35 | 1.15 | 1.25 | 1.40 |
| $E_{eff\ tot} = E_{eff} + E_{satFb}$ | 164 | 184 | 194 | 204 |
| $\frac{E_{eff\ tot}}{L}$ | 0.35 | 0.39 | 0.41 | 0.43 |
| $\frac{E_{eff}}{L}$ | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |

L'évolution du maintien de l'ouvrabilité des BAP non fibrés et BAP fibrés répondant à l'exigence *Etalement* = $D_{moyen} = 65^{\pm 2cm}$ est représentée dans la figure I.34.

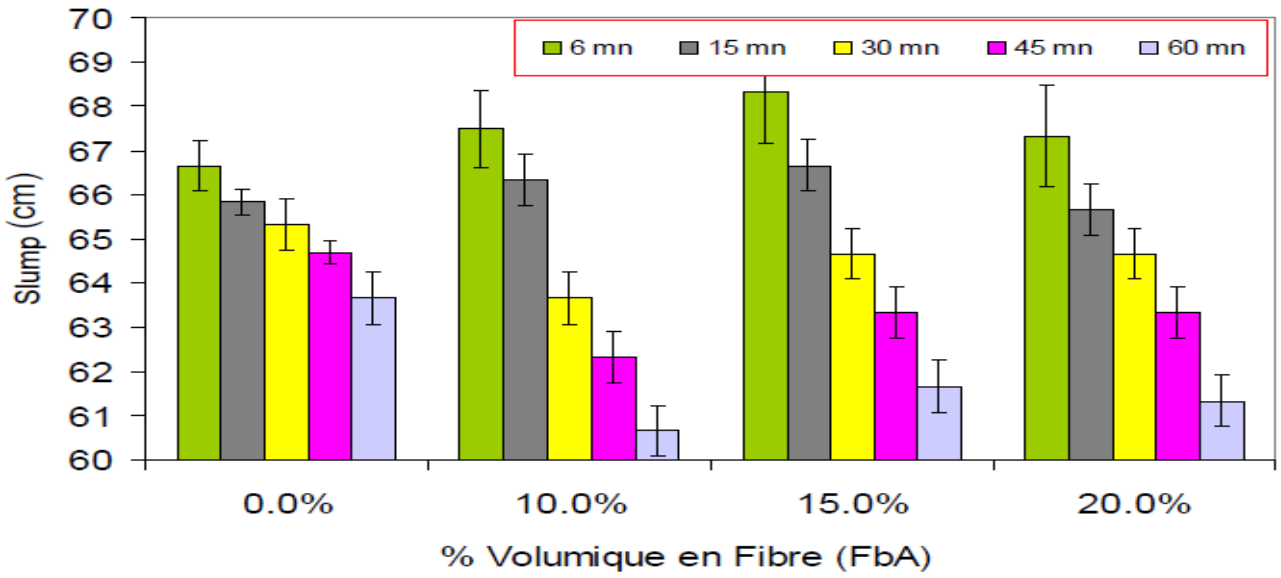



**Figure I.34 :** Evolution de Slump en fonction du temps **[74]**.

On observe une diminution de la stabilité de l'ouvrabilité du BAP qui diminue au cours du temps, cette diminution devient importante quand la teneur des fibres augmente.

On remarque une perte de l'étalement conséquente consécutive à l'introduction des fibres. La perte de l'ouvrabilité est plus importante pour $V_f$=10%. La cinétique de diminution de l'étalement est plus prononcée pour les BAP fibrés.

Le temps $T_{500}$ a été mesuré et les caractéristiques rhéologiques des BAP fibrés ont été calculées (tableau I.10). L'analyse des résultats révèle que l'introduction de la fibre FbA est à l'origine de l'augmentation de la viscosité du BAP et d'une légère diminution du seuil de cisaillement. Son rôle ressemble à celui d'un agent de viscosité **[74]**.

**Tableau I.10 :** Résultats de la viscosité ' $\eta_p$ ' et la contrainte de cisaillement '$\tau_0$ '**[74].**

| Dosage | BAP-0% FbA | BAP-10% FbA | BAP-15%FbA | BAP-20% FbA |
|---|---|---|---|---|
| $T_{500}$ | 4.08 | 6.67 | 7.67 | 6.33 |
| $\eta_p$ | 267.3 | 365.4 | 381.5 | 310 |
| $T_0$ | 148.2 | 131.4 | 126 | 115.8 |

### I.5.2.2 Ouvrabilité des BAP fibrés en milieu confiné

La figure I.35 montre l'évolution du taux de remplissage ' $H_2$ / $H_1$ ' en fonction du dosage en superplastifiant pour différents dosages de fibres.

Les résultats de L-Box montrent que les fibres affectent le dosage en superplastifiant et surtout l'écoulement du BAP. Les BAP fabriqués par des teneurs élevées de fibres présentent une mobilité moyennement bonne en milieu confiné.

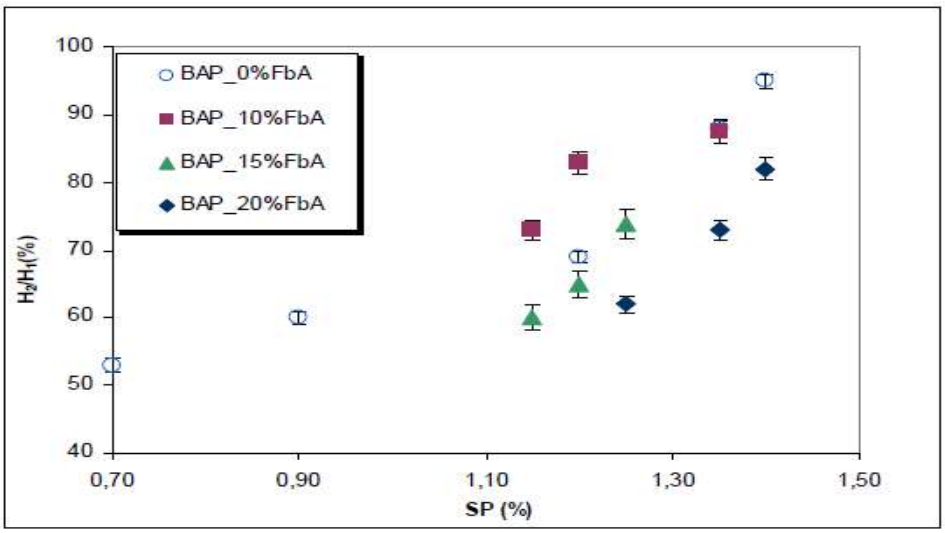



**Figure I.35 :** Résultats de L-Box pour différents dosages de fibres **[74]**.

Les résultats obtenus à partir de l'essai J-Ring indiquent que tous les BAP fibrés vérifient les recommandations ($\Delta H = H_{int} - H_{ext} \leq 20mm$) est que l'introduction de la FbA diminue le risque de blocage du BAP estimés à travers l'indice $\beta = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{V_{cone}} \Delta H$ **[74].**

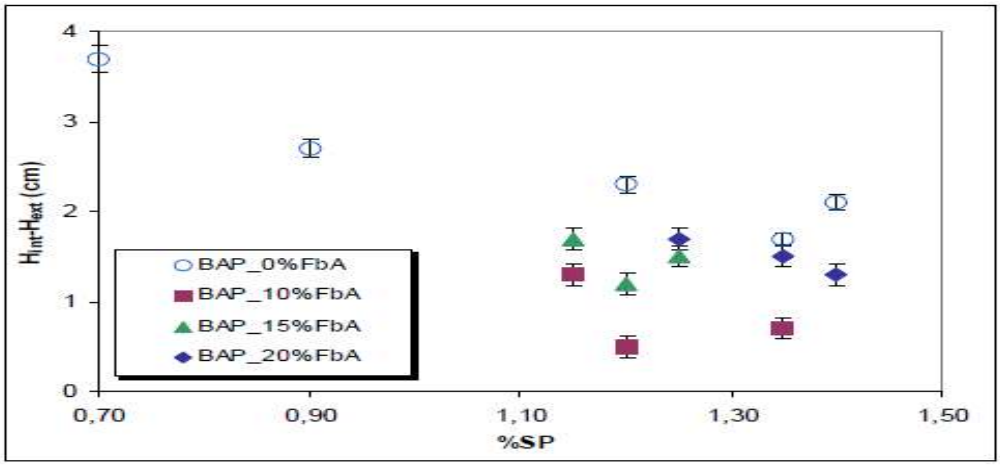



**Figure I.36:** Résultats de J-Ring pour différents dosages de fibres **[74]**.

### I.5.2.3 Stabilité des BAP fibrés

Les résultats issus des essais de stabilité au tamis montrent que toute les compositions testées ont une stabilité satisfaisante (0%<π<15%). La figure I.37 n'indique aucune influence des fibres sur la stabilité du BAP.

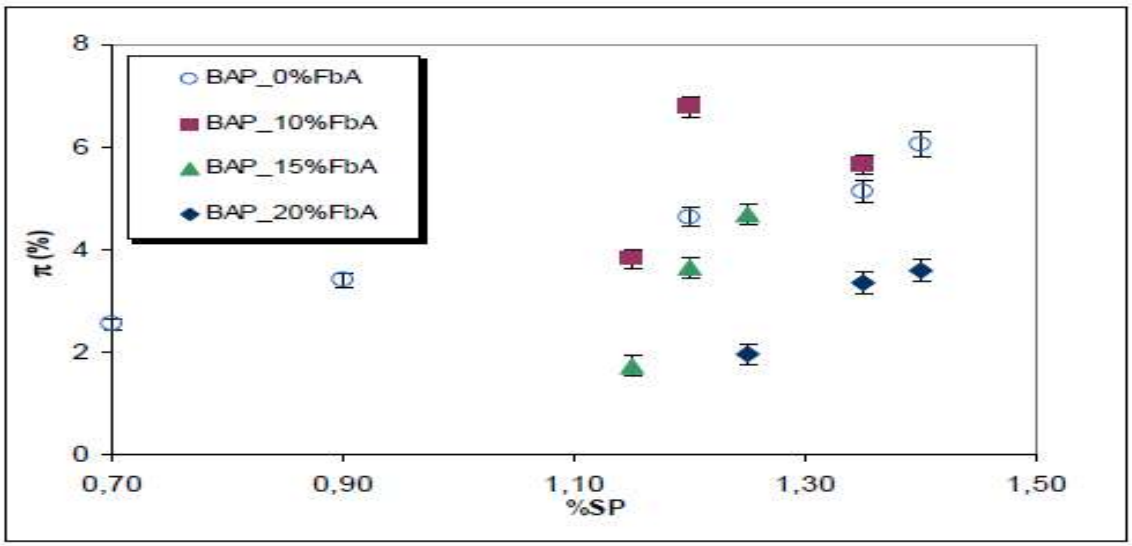



**Figure I.37:** Evolution de la laitance en fonction du dosage en superplastifiant **[74]**.

D'après les résultats, on conclut que, l'introduction de la fibre FbA augmente la viscosité du béton et favorise son étalement, la stabilité ainsi que l'étalement du BAP sont améliorés avec l'ajout de la fibre FbA. Sa masse volumique diminue de façon significative **[74]**.

Tableau I.11récapitule les résultats expérimentaux des BAP témoins fabriqués par la fibre FbA.

**Tableau I.11 :** Compositions et propriétés des BAP témoins fibrés **[74]**.

| BAP | BAP-0% FbA | BAP-10% FbA | BAP-15% FbA | BAP-20% FbA |
|---|---|---|---|---|
| **Dosage** | | | | |
| Ciment ($kg/m^3$) | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Fillers ($kg/m^3$) | 116 | 116 | 116 | 116 |
| Fibres ($kg/m^3$) | 0% | 10% | 15% | 20% |
| Sable ($kg/m^3$) | 939 | 802 | 611 | 552 |
| Gravillon ($kg/m^3$) | 784 | 669 | 731 | 660 |
| Eau efficace ($kg/m^3$) | 164 | 184 | 194 | 204 |
| Sp (%) | 1.35 | 1.15 | 1.25 | 1.40 |
| **Propriété à l'état frais** | | | | |
| SF (cm) | 66.5 | 67.2 | 67.6 | 67 |
| $T_{500}$ (s) | 4 | 6 | 7 | 6 |
| V-funnel (s) | 11 | 12 | 11 | 10 |
| $H_{int}$-$H_{ext} \leq 5$ (cm) | 1.7 | 1.3 | 1.5 | 1.3 |
| $H_2/H_1$ (%) | 88 | 73 | 74 | 82 |
| $\pi$ (%) | 7.27 | 3.82 | 4.68 | 3.59 |
| Air occlus (%) | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.75 |
| Densité théorique | 2.369 | 2.092 | 1.996 | 1.845 |
| Densité expérimentale | 2.374 | 2.108 | 1.982 | 1.894 |

### I.5.3 Les propriétés des BAP de fibres végétales à l'état durci

#### I.5.3.1 Propriétés physiques du BAP fibrés

##### I.5.3.1.1 Porosité

La porosité du BAP a été étudiée en testant trois dosages volumiques de fibres. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau I.12.

**Tableau I.12 :** Résultats de la porosité du BAP pour différents dosages de fibre **[74]**.

| BAP | BAP-0% FbA | BAP-10% FbA | BAP-15% FbA | BAP-20% FbA |
|---|---|---|---|---|
| Porosité (%) | 10.15 | 14.3 | 15 | 16 |
| Sp (%) | 1.35 | 1.25 | 1.35 | 1.4 |

Ces résultats montrent que l'introduction des fibres végétales augmente la porosité dans le BAP (tableau I.12). Cette augmentation de la porosité est d'autant plus importante quand la teneur de fibre augmente. Cela signifie que la compacité diminue (ce qui corrèle avec les résultats de la pate renforcée) **[74]**.

##### I.5.3.1.2 La perméabilité aux gaz

La figure I.38représente les résultats de l'évolution de la perméabilité du BAP en fonction de la porosité pour différents dosages volumiques de fibres.

La perméabilité du BAP augmente en introduisant les fibres végétales. Cette diminution devient importante quand le dosage des fibres est élevé ce qui conduit à un BAP mois compact (la porosité et la perméabilité sont plus élevées, ce qui corrèle avec les résultats de la compacité obtenus sur la pate renforcée) **[74]**.

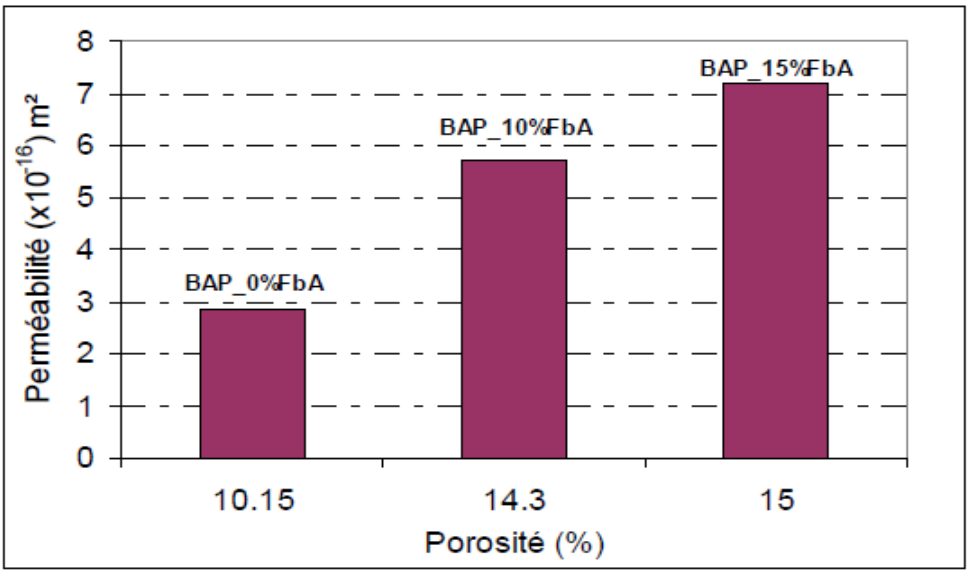



**Figure I.38 :** Evolution de la perméabilité du BAP en fonction de la porosité pour différents dosages de fibres **[74]**.

### I.5.3.1.3 Mesure de la ségrégation

L'introduction des fibres végétales sur la ségrégation statique du BAP a été étudiée. On utilise la même procédure adoptée pour caractériser la ségrégation statique dans le BAP non fibré.




**Figure I.39:** Observation de la ségrégation des BAP témoins fibrés **[74]**.

Donc les résultats montrent qu'on n'a pas de ségrégation particulière sur les trois BAP fibrés.

L'introduction des fibres végétales dans le BAP n'influent pas sur la ségrégation statique **[74]**.

### I.5.3.2 Propriétés mécaniques du BAP fibrés

#### I.5.3.2.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du BAP fibrés est mesurée au cours du temps sur éprouvettes 16x32cm. La figure I.40montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP pour différents dosages de fibre FbA.

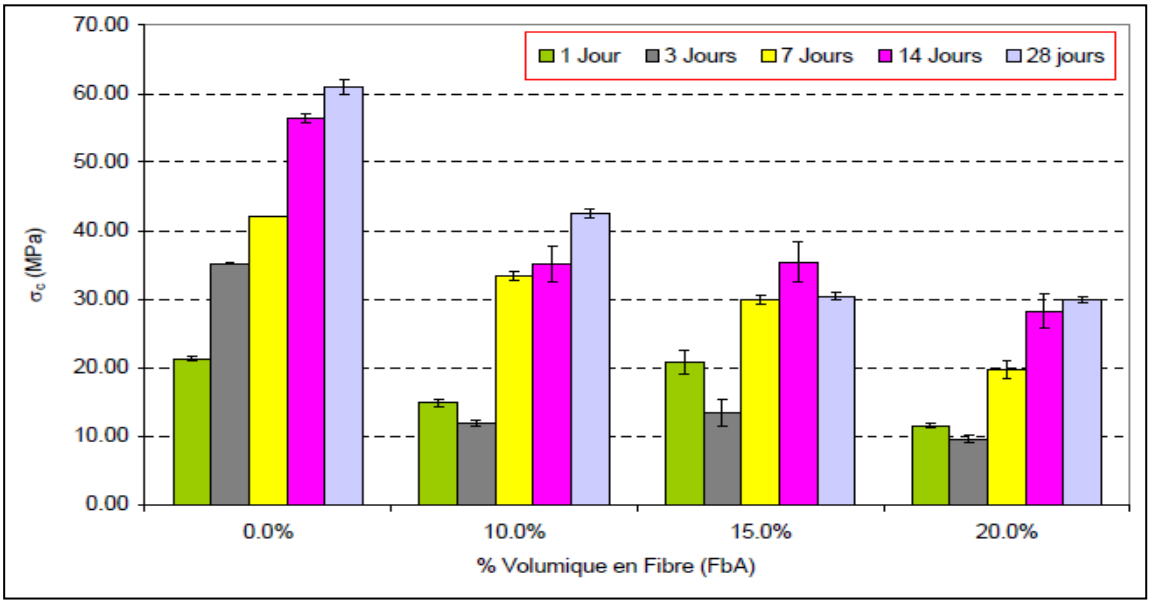



**Figure I.40:** Evolution de La résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP **[74]**.

L'introduction de la fibre végétale FbA dans le BAP n'améliore pas la résistance à la compression, ni au jeune âge ni au moyen âge. On note une diminution significative des résistances à la compression. Ceci peut s'expliquer partiellement par les valeurs du rapport $\frac{E_{eff\ tot}}{L}$ qui augmente et atteint des valeurs élevées et par la diminution sensible du dosage en granulats.

La résistante à la compression du BAP fibré est systématiquement plus faible que celle du BAP non fibré, la différence atteint plus que 50% pour $V_f$ = 20% **[74]**.

#### I.5.3.2.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité est également déterminé lors des essais de compression réalisé sur des éprouvettes 16x32cm en utilisant un extensomètre équipé de trois capteurs de déplacement LVDT. Le module noté $E_j$, est déduit de la pente contrainte-déformation en pré-pic.

La figure I.41 représente l'évolution du module d'élasticité en fonction de l'âge du BAP pour différents dosages de fibres FbA **[74]**.

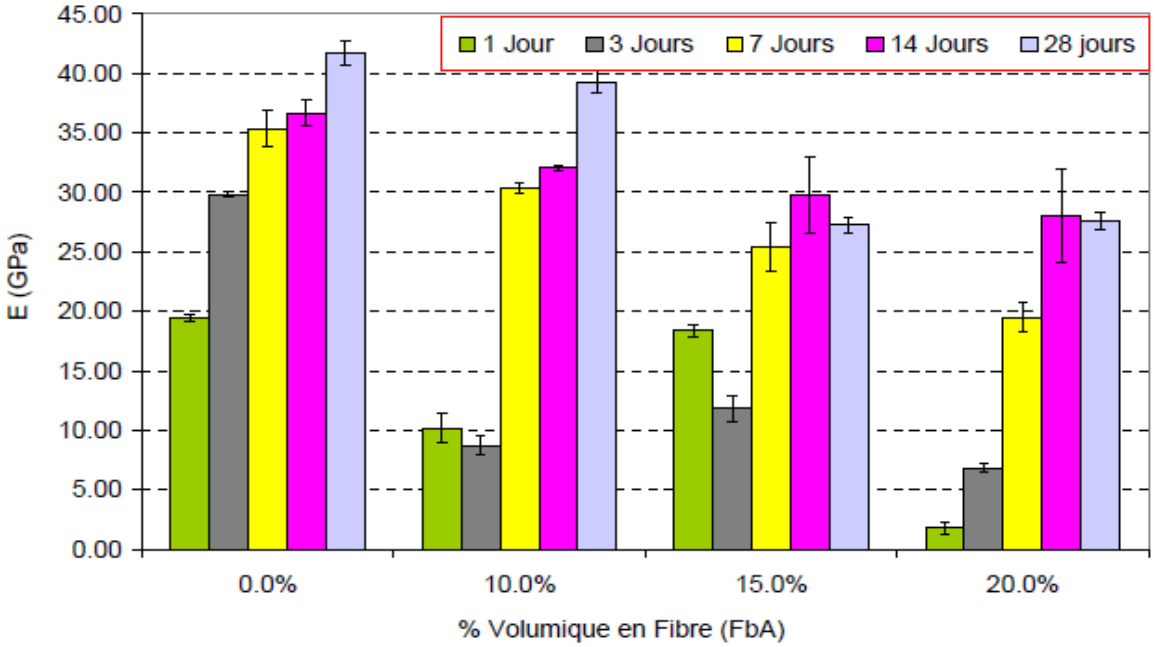
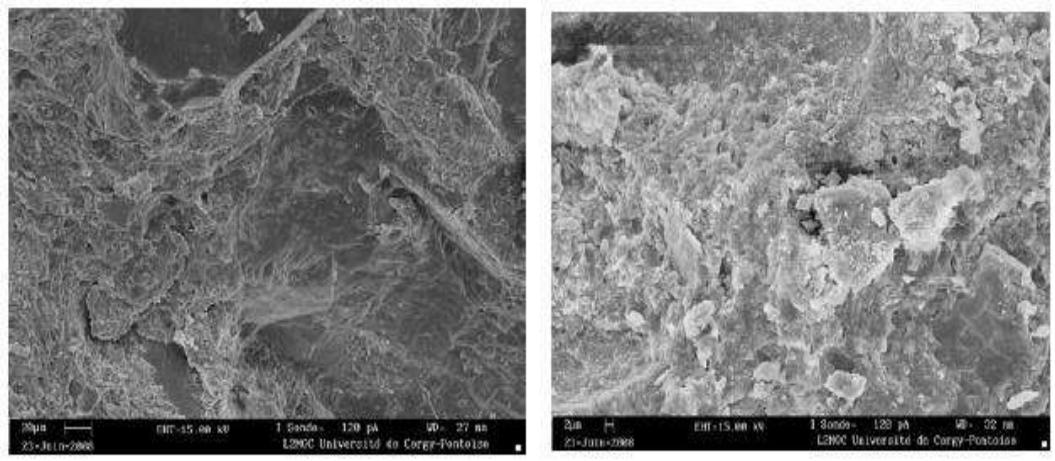



**Figure I.41:** Evolution du module d'élasticité en fonction de l'âge du BAP **[74]**.

Bien que le module diminue avec le dosage en FbA et ceci de façon plus significative au jeune âge, on remarque une baisse moins importante que celle observée pour les résistances à la compression. A 28 jours un dosage volumique de 20% de FbA n'engendre qu'une baisse de rigidité de 75% alors que celle relative à la résistance à la compression est 50% **[74]**.

Les observations de faciès de rupture des deux BAP fibrés et non fibrés réalisées sur éprouvettes sollicitées en compression à 28 jours montrent une bonne répétition des fibres végétales dans la matrice du BAP, mais la présence des vides plus importante dans le BAP fibré expliquant en partie la baisse du module et celle de la résistance à la compression (figure I.42) **[74]**.



(a) (b)

**Figure I.42:** Quelques observations au MEB : (a) BAP non fibré et (b) BAP fibré avec $V_f$=10% de FbA **[74]**.

La figure I.43 représente l'évolution du module d'élasticité en fonction de la résistance à la compression du BAP non fibré et fibré avec 10% de FbA du 1 jour jusqu'aux 28 jours **[74]**.

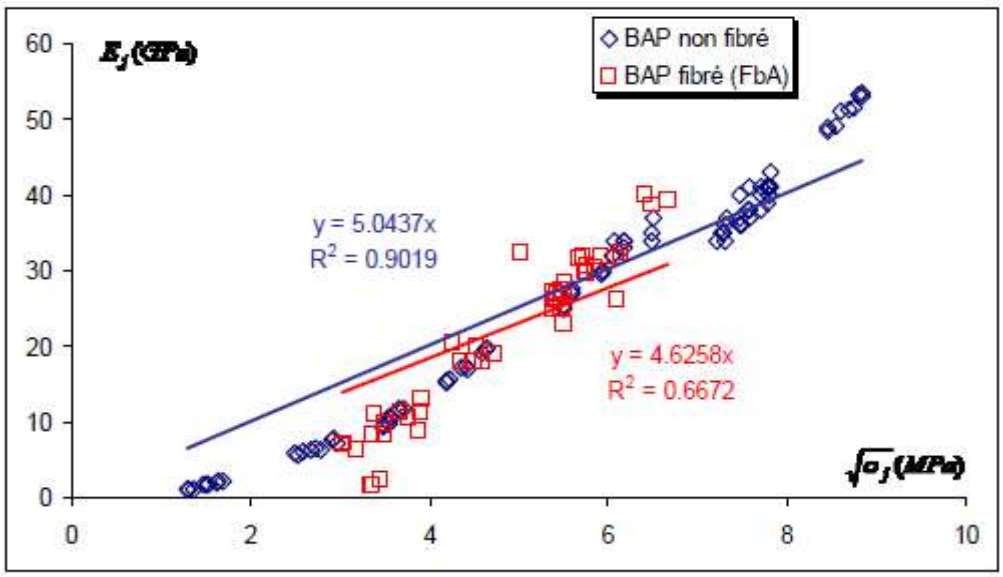



**Figure I.43:** Relation entre module d'élasticité et la résistance à la compression comparant le BAP fibré et non fibré **[74]**.

L'évolution du module d'élasticité du BAP en fonction de la contrainte à la compression suit une loi de type :

$$E = 4{,}62\sqrt{\sigma_c} \qquad \textbf{(I.12)}$$

Pour le BAP non fibré nous avons montré que le comportement est bien décrit par l'équation :

$$E = 5{,}04\sqrt{\sigma_c} \qquad \textbf{(I.13)}$$

Ces deux équations sont très proches et on montre que l'équation Eq IV-7 permet de décrire le comportement du BAP fibré et non fibré :

$$E = 4.79\sqrt{\sigma_c} \qquad \textbf{(I.14)}$$

Cette équation concorde avec celle trouvée par (ASS 04 [(a)]) ( $E = 4{,}64\sqrt{\sigma_c}$ ) et [ACI92] **[74] :**

$$E = 4.73\sqrt{\sigma_c} \qquad \textbf{(I.15)}$$

Dans cette étude les résultats rhéologiques obtenus sur la pate et le BAP fibré, ont révélés que :

- ✓ Les essais de mini cône de Marsh, nous ont permis de déterminer le dosage minimal du rapport $\frac{E_{eff}}{L}$ et le dosage optimal en superplastifiant de la pate fibrée.
- ✓ L'introduction des fibres végétales dans la pate, conduit à une augmentation de la demande en eau, le rapport $\frac{E_{eff}}{L}$ augmentant le dosage des fibres. Cependant, la compacité de la pate diminue systématiquement vue les vides crées par ces fibres.
- ✓ La demande en superplastifiant augmente, la détermination du dosage optimal en superplastifiant est difficile : Les essais de mini cône de Marsh nous ont aidé à déterminer le dosage minimal en superplastifiant de la pate fibrée.
- ✓ L'évolution de l'ouvrabilité du BAP au cours du temps diminue, particulièrement aux environnements confinés.
- ✓ Les essais de la stabilité au tamis prouvent que toutes les formulations sont stables. Cependant, il s'avère que l'augmentation de la teneur de fibres mène à un BAP stable.
- ✓ Des corrélations, entre les résultats obtenus des essais réalisés sur la pate en utilisant le mini cône de Marsh et les résultats des essais réalisés sur le BAP fibré et non fibré sont établis.

D'autres part, les résultats des propriétés physique et mécaniques obtenue sur le BAP fibré, ont montré que :

- ✓ Les fibres végétales affectent la porosité et la perméabilité du BAP, en augmentent le dosage des fibres le BAP devient moins compacte.
- ✓ La mesure de la ségrégation statique dans le BAP fibré révèle qu'il n'y a pas d'influence des fibres végétales.
- ✓ La résistance à la compression du BAP fibré diminue significativement. Cette diminution est imputée à un rapport $\frac{E_{eff}}{L}$ plus élevé **[74]**.

## I-6 Conclusion

L'utilisation des fibres de toutes natures dans plusieurs domaines en particulier dans la construction est de plus en plus pratiquée. Vu les problèmes de santé que présente les fibres d'amiante, leur substitution par des fibres végétales ou polymères est un enjeu médico-économique important. De ce fait, de récentes recherches sont en cours dans le but d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par des fibres végétales, de verre ou de polymère.

La nature des fibres utilisées est en relation avec leurs applications et les modes de mise en œuvre. Le choix des fibres dépend du rôle que l'on désire faire jouer.

Il est certain qu'un rôle structural assez élevé associe à une grande durabilité et à une utilisation économique exige l'emploi de fibres de haute module comparé à celui de la matrice, et non altérables, disponibles sur le marché local à des prix acceptables.

Actuellement, les types de fibres les plus utilisés dans le renforcement des bétons sont les fibres d'acier. Mais vu le problème économique que présente la production des fibres d'acier, de verre ou de polymère. Particulièrement pour les pays en voie de développement qui possèdent une grande richesse en fibres naturelles, l'avenir en terme de renforcement sera attribué aux fibres naturelles, ou bien à la limite pour les fibres composites (polymère-végétales). Ainsi, il est tant d'orienter les axes de recherches vers la valorisation des fibres naturelles dans la construction d'une façon générale et le béton d'une façon particulière.

Quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude des fibres végétales (fibre de palmier, Alfa Abaca, chanvre de coton …), la valorisation des fibres dans les domaines pratiques n'est pas encore généralisée.

Parmi les fibres qui existent dans la région du sud Algérien, on a remarqué que la récolte des dattes cause plusieurs de déchets, dans le but de recycler ces déchets on a pensé de valoriser les régimes dattier et l'utiliser comme un renfort dans la matrice cimentaire d'un béton autoplaçant.

En deuxième volée, on penser aussi d'utiliser des fibres issues de recyclages des sacs d'halfa comme un deuxième type de renfort.

# CHAPITRE II

# *Méthodologie des éssais*

## 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.
- BAPFR : béton autoplaçant de fibres de régime.
- BAPFH: béton autoplaçant de fibres d'halfa.

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

**Essais sur béton frais** :

- Cône d'Abrams
- V-Funnel
- J-Ring
- L-Box
- U-Box
- Stabilité au tamis
- Air occlus
- Densité

**Essais sur béton durci** :

- Essai de compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- Essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm.
- Essai ultrasonique.
- Essai scléromètrique.

- Absorption d'eau par capillarité.
- Retrait 7x7x28 cm.

## II.2 Caractérisation des matériaux utilisés

### II.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Matine), est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Laforge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[75].**

Le tableau II.1 résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clincker, selon la fiche technique du ciment **[76].**

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

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




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

### II.2.2 Granulats

#### II.2.2.1 Sable

Le sable utilisé provient de la région de **Bouguezoul**, c'est un sable roulé ayant un module de finesse de 2.018 (NF P18-560) **[77]** et un équivalent de sable de 82.53% (NF P18-598) **[75]**, taux d'absorption d'eau 0.5 % (NF P18-555) **[79]**, la masse volumique apparente 1403 kg/m$^3$ (NF P18-555) **[79]**, La masse volumique absolue 2500 kg/m$^3$ (NF P18-555) **[79]**. L'analyse granulométrique est présentée dans la figure II.5.



**Figure II.2:** 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.3 et II.4 provenant de la carrière de Mont Guorno de la région de Berrouaguia (Médéa) dont les propriétés physiques et mécaniques sont présentées au tableau II.2 et l'analyse granulométrique est présentée dans la figure II.5.



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



**Figure II.4 :** 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 **[76]** |
| **Masse volumique apparente (g/cm3)** | **1.29** | **1.27** | NF EN 1097-3 **[80]** |
| **Taux d'absorption d'eau (%)** | **1.08** | **1.62** | NF EN 1097-6 **[76]** |
| **Résistance aux chocs (Los-Angeles)** | **24.10** | **26.18** | NF EN 1097-2 **[81]** |

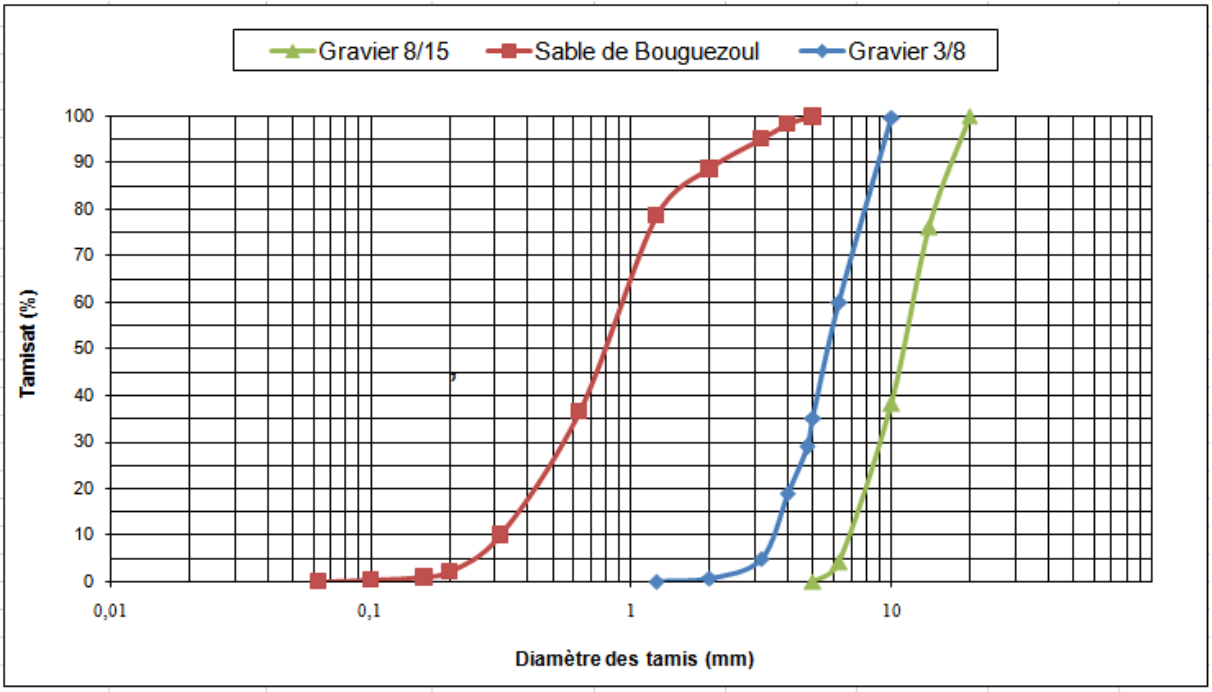



**Figure II.5:** Analyse granulométrique des granulats.

### 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 fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment **[82]**. **(Voire annexe B).** Ses caractéristiques sont :

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




**Figure II.6 :** MEDAFLOW 30.

### II.2.5 Fibres végétales

#### II.2.5.1 Régimes

Ce sont des fibres de forme ondulés et rectilignes, ils sont obtenus par le recyclage des régimes du dattier. On prépare les fibres pour obtenir une longueur de 4 cm de longueur, et de diamètre de 2 à 3 mm que nous avons déterminé par l'appareil de pied à coulis et de taux d'absorption 15.6% et de masse volumique 1000 kg/m$^3$ **(voir annexe D)**.

Nous avons incorporé ces fibres dans le béton par addition par rapport au volume du béton avec des pourcentages de 1 % ,1.3%.

**FR :** Fibre Régime.



**Figure II.7 :** Les fibres des régimes.

### II.2.5.2 Halfa

Ce sont des fibres de forme rectilignes, ils sont obtenus par le recyclage des sacs d'halfa. Ce type de fibre a une dimension de 4 cm de longueur, et de diamètre de 0.5 mm que nous avons déterminé par l'appareil de pied à coulis, de taux d'absorption 53.84% et de masse volumique 750 kg/m$^3$ **(voir annexe D)**.

Nous avons incorporé ces fibres dans le béton par addition par rapport au volume du béton avec des pourcentages de 1 % ,1.3%.

**FH :** Fibre Halfa.



**Figure II.8 :** Les fibres d'halfa.

## II.3 La formulation du béton

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

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

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

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

Les caractéristiques des BAP doivent permettre d'assurer :

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

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

L'effet de la variation des types des fibres végétales 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 le pourcentage de deux types des fibres végétales de 1% et 1.3% 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 35 litres dans un malaxeur d'une capacité maximale de 40 litres.

Le tableau II.3 présente les différentes compositions des bétons confectionnés lors de la deuxième étape de cette étude. Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe A. Ces bétons contiennent des volumes fixes en sable et en gros granulats de diamètre maximum 15 mm de l'eau, de ciment et de superplastifiant ; et des volumes variables des fibres végétales.

**Tableau II.3:** Compositions des différents BAP étudiés dans $1m^3$ du béton.

| | **BAPT** | **BAPFR 1%** | **BAPFR 1.3%** | **BAPFH 1%** | **BAPFH 1.3%** |
|---|---|---|---|---|---|
| **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 | 10 | 13 | 7.5 | 9.75 |

Avec :

**BAPT :** Béton AutoPlaçant Témoin (sans fibres).

**BAPFR :** Béton AutoPlaçant de Fibres de Régime.

**BAPFH :** Béton AutoPlaçant de Fibres d'Halfa.

## 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 II.9; elle suit les étapes suivantes :

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

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

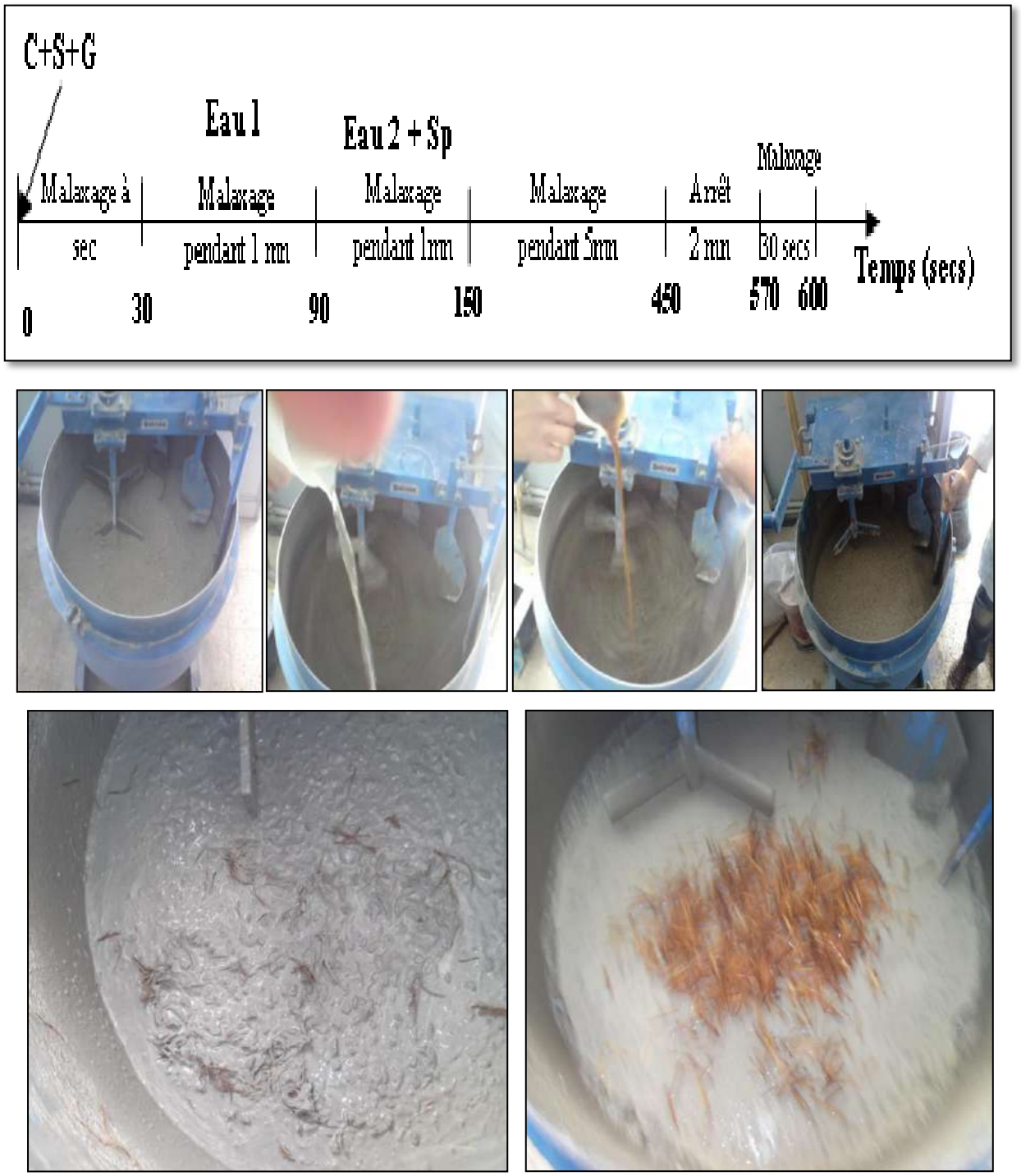



**Figure II.9 :** Séquence de malaxage du béton autoplaçant témoin et fibré.

### II.4.2 Béton frais

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

**Tableau II.4 :** Essais de caractérisation sur bétons frais.

| Mélange | Essais | Appareil | Nombre de gachées |
|---|---|---|---|
| BAPT | Ouvrabilité | Cône d'abrams<br>V-Funnel<br>J-Ring<br>L-Box<br>U-Box<br>Stabilité au tamis | 5 |
| BAPFR | | | |
| BAPFH | | | |
| BAPT | Densité | Aérométre | 5 |
| BAPFR | | | |
| BAPFH | | | |
| BAPT | Air occlus | Aérométre | 5 |
| BAPFR | | | |
| BAPFH | | | |

### II.4.2.A 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 régle 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.10 :** Développement de l'essai d'étalement.

### II.4.2.B 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.11) ;
- 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 $\boldsymbol{h_j}$, (Figure II.11), selon la formule (II.1)

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

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

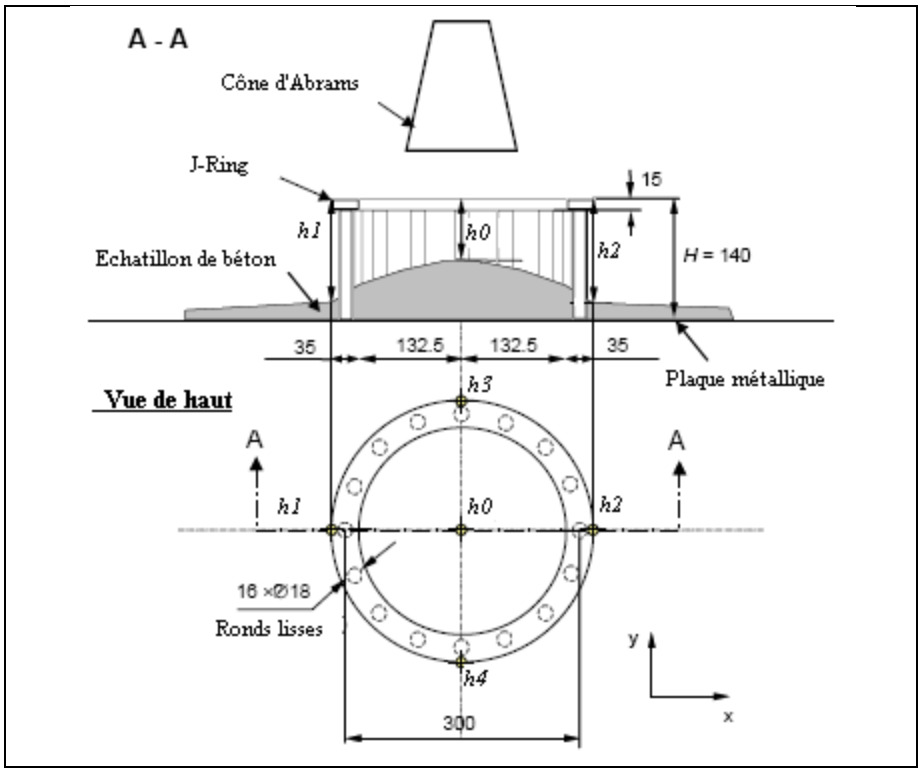



**Figure II.11** : Les dimensions du J-Ring et les positions de mesure des hauteurs.



**Figure II.12 :** Protocole de l'essai du J-Ring.

### II.4.2.C Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

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

**a. Matériel nécessaire**

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

**b. Mode opératoire**

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

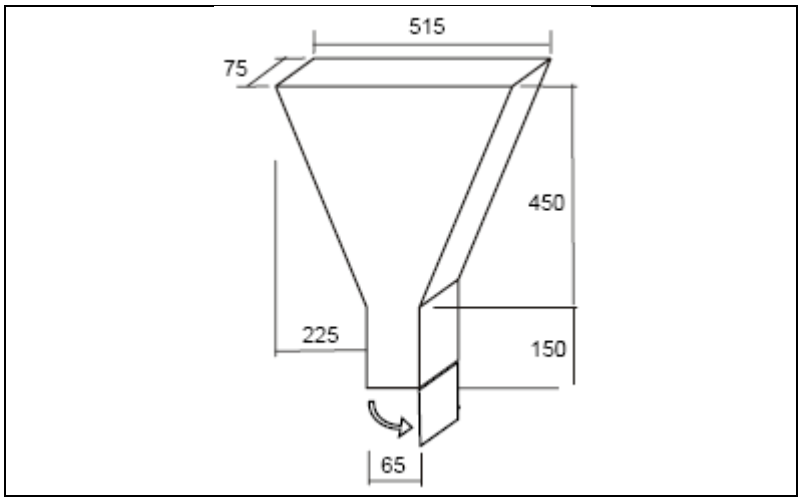



**Figure II.13 :** Dimensions de l'entonnoir (V-funnel).



**Figure II.14 :** Protocole de l'essai d'entonnoir (V-funnel).

### II.4.2.D 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.15 ;
- 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.15)

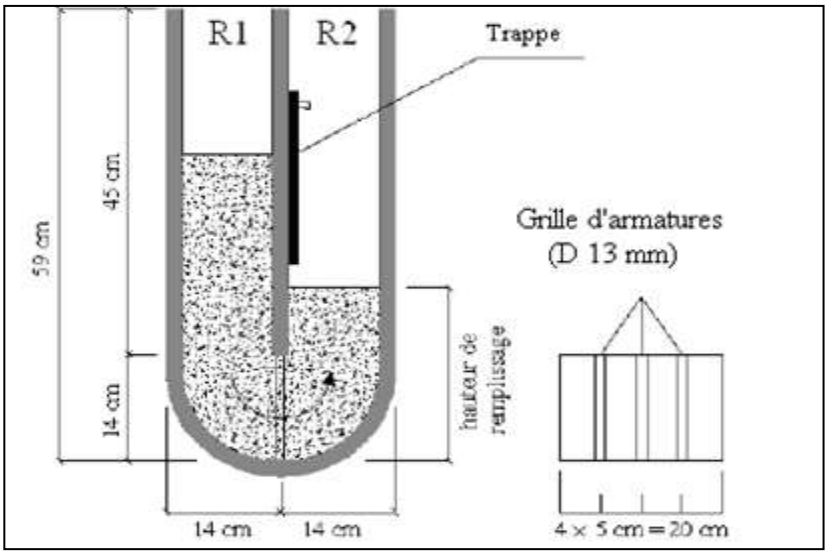



**Figure II.15 :** Dimensions de la boite en U (U-Box).



**Figure II.16 :** Protocole de l'essai de la boîte de U (U-Box).

### II.4.2.E Essai de stabilité au tamis

Il permet de tester la ségrégation du mélange frais.

**a. Matériel nécessaire**

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

**b. Mode opératoire**

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

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



**Figure II.17 :** Protocole de l'essai de stabilité au tamis.

### II.4.2.F 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.18.

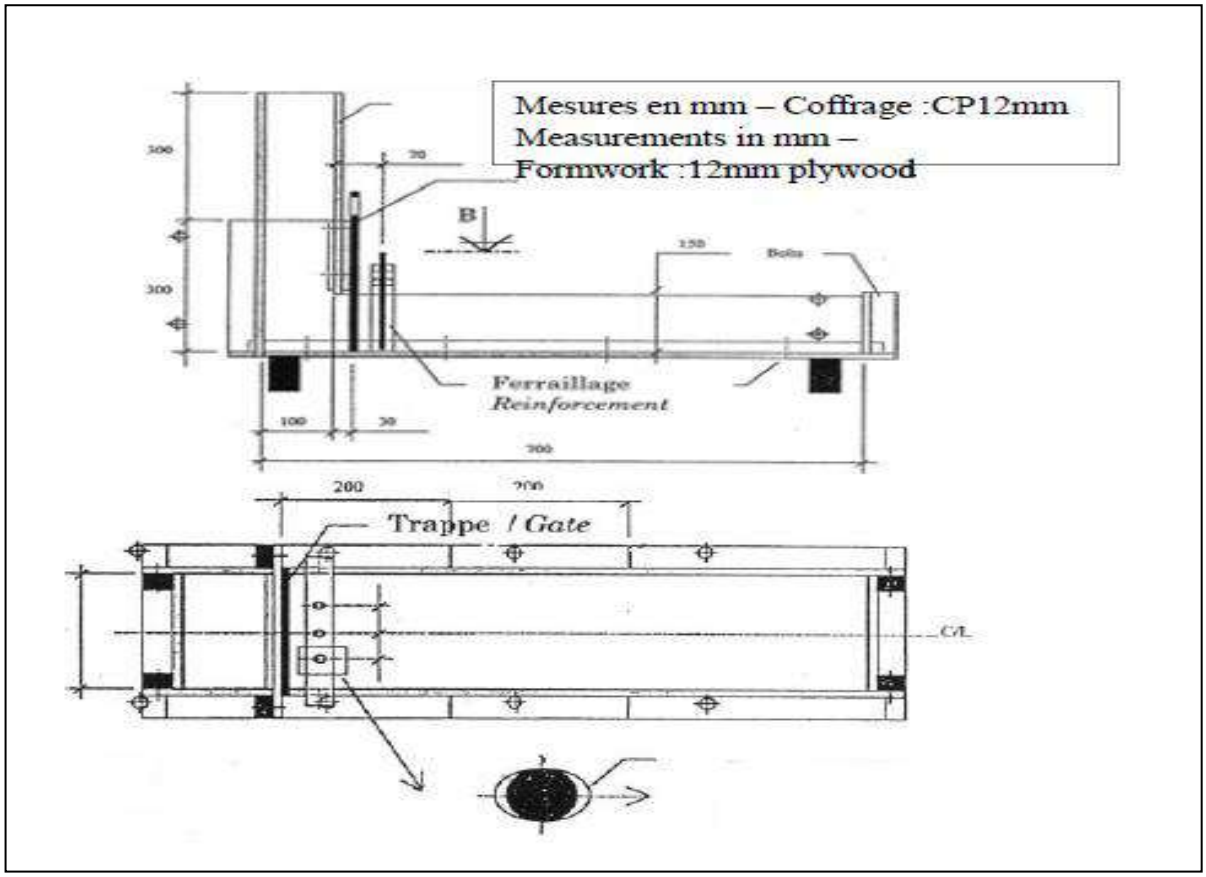



**Figure II.18 :** Dimensions de l'essai de L-Box.

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.19 :** Protocole de l'essai de la boîte de L-Box.

**II.4.2.G L'air occlus** NF EN 12350-7 **[83]**

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 » (Figure. II. 20).

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.20:** Aéromètre à béton

### II.4.2.H La 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.21:** Mesure de la densité du béton.

### II.4.3 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.22 :** Conservation des éprouvettes.

### II.4.4 Béton durci

Les essais de caractérisation sur béton durci sont résumes dans le tableau II.5 suivant :

**Tableau II.5 :** Essais de caractérisation sur bétons durcis.

| Mélange | Nombre d'éprouvette | Dimension (m3) | Age | Types d'essai |
|---|---|---|---|---|
| BAPSF | 30 | 10x10x10 | 7 et 28 jours | compression |
| BAPFR | | | | |
| BAPFH | | | | |
| BAPSF | 30 | 7x7x28 | 7 et 28 jours | Traction par flexion |
| BAPFR | | | | |
| BAPFH | | | | |
| BAPSF | 30 | 7x7x28 | 1, 2, 3, 7,14et28 jours | Retrait et gonflement |
| BAPFR | | | | |
| BAPFH | | | | |

#### II.4.4.1 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 (Figure II.23). 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 (Figure II.24), puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé (Figure II.25).




**Figure II.23 :** Étalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau de calibrage.



**Figure II.24:** Graissage des faces d'éprouvette avec la vaseline



**Figure II.25:** 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 **[84]**, NA 5027 **[85].**

### II.4.4.2 Essai scléromètrique

Il est procédé au relevé 3 mesures sur éprouvettes prismatique 7 x 7 x 28cm avec le respect des distances à l'aide d'un scléromètre (figure II.26). Les éprouvettes doivent être maintenues entre les plateaux de la presse sous une contrainte de 0.5 MPa.



**Figure II.26 :** Le scléromètre.

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).




**Figure II.27 :** Mesure de l'indice de rebondissement par le scléromètre.

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 ;

$28 \leq lsm \leq 32$ : 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 28.

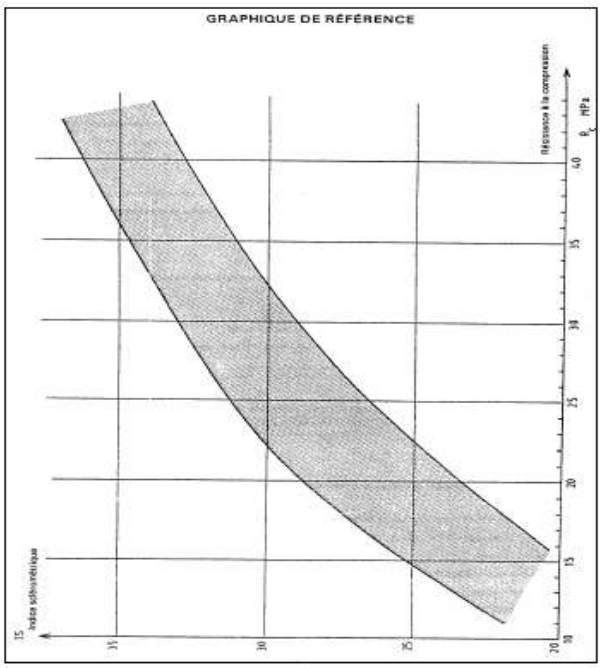



**Figure II.28 :** Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes.

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.4.4.3 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 **[86]**, NA 427**[87]**).
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**[88]**
(Figure. II.29).



**Figure II.29 :** 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.30 :** Essai de compression.

### II.4.4.4 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 **[89]** munie d'un banc de flexion 4 points (Figure II.30).

Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 **[90], (**NA 428) **[91],** ASTM C293 **[92]**, 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 $f_{tj}$ = 3,6M / a. avec les détailles.



L'éprouvette avant l'essai.



L'éprouvette après l'essai.

**Figure II.31:** Essai de traction par flexion.

### II.4.4.5 Retrait et gonflement

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

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28cm) conformément à la norme NF P 15-404 **[93].**

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (Figure. II.32) 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 ; et le gonflement la conservation des éprouvettes est faite à un bac d'eau de température de 25 à 30°C.

.



**Figure II.32:** 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 (Figure. II.33).



**Figure II.33 :** 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 prés 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,

**$L_0$** : 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).

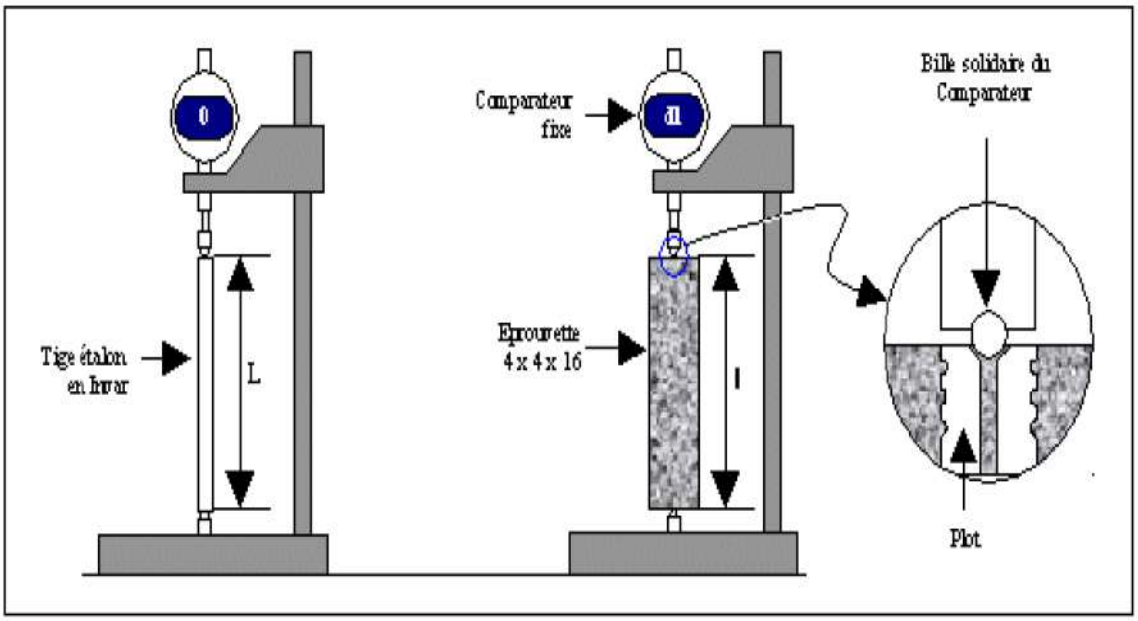



**Figure II.34** : Appareillage pour la mesure du retrait.

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

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

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

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

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif: il y a alors gonflement).

### II.4.4.6 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 (Fig. 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) **[95]**.

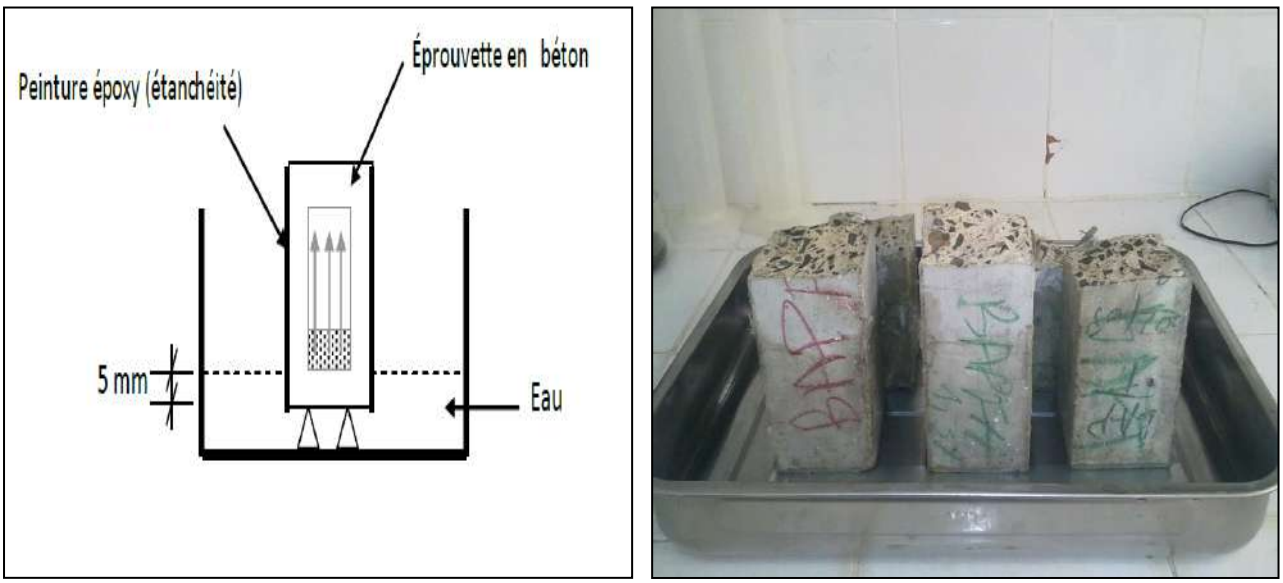



**Figure II.35 :** Absorption d'eau par succion capillaire.

## II.5 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 autoplaçant. 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, scléromètrique, absorption d'eau, retrait). pour reconnaitre l'effet des fibres végétales sur le béton Autoplaçant que se soit à l'état frais ou durci.

# CHAPITRE III

# *Résultats et Interprétations*

## 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 frais

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

| Béton | Étalement | | J-Ring | | | Temps d'écoulement V-funnel | Hauteur de remplissage (U-Box) | Stabilité au tamis |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Étalement D (mm) | $T_{50}$ (sec) | Étalement $D_J$ (mm) | $T_{50}$ (sec) | Hauteur $H_{ext}$-$H_{int}$ (mm) | (mm) | (cm) | (%) |
| **BAPT** | 622 | 2.02 | 614 | 3.15 | 9.70 | 4.02 | 31.00 | 1.78 |
| **BAPFR 1%** | 595 | 2. 90 | 587 | 3.25 | 14.50 | 4.8 | 27.5 | 1.02 |
| **BAPFR 1.3%** | 560 | 3.03 | 549 | 3.31 | 20 | 4.91 | 23.00 | 0.89 |
| **BAPFH 1%** | 615 | 2.03 | 609 | 3,08 | 10 | 4.04 | 31.50 | 1.72 |
| **BAPFH 1.3%** | 619 | 2.05 | 612 | 3,1 | 10.5 | 4.06 | 32.00 | 1.75 |
| **Limites Pour Les BAP** | 600-850 mm | - | 650-850 mm | - | ≤10 mm | 4-12 secs | ≥30 cm | ≤15 % |

**Tableau III.2 :** Résultats obtenus sur les BAP étudiés à l'état frais (suite).

| Béton | L-Box | | | Densité | Air occlus (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| | $T_{20}$ (sec) | $T_{40}$ (sec) | Hauteur $H_2/H_1$ (mm) | | |
| **BAPT** | 2.15 | 3.00 | 0.8 | 2.62 | 4 |
| **BAPFR 1%** | 2.75 | 3.25 | 0.68 | 1.81 | 6.2 |
| **BAPFR 1.3%** | 2.84 | 3.75 | 0.63 | 1,85 | 6.4 |
| **BAPFH 1%** | 2.17 | 3.07 | 0.77 | 2.61 | 4.09 |
| **BAPFH 1.3%** | 2.08 | 3.09 | 0.79 | 2.61 | 4.2 |
| **Limites Pour Les BAP** | - | - | ≈0.9 | - | - |

### III.2.A Effet des fibres végétales sur la capacité de passage et $T_{50}$ du BAP et la différence des hauteurs (J-Ring)

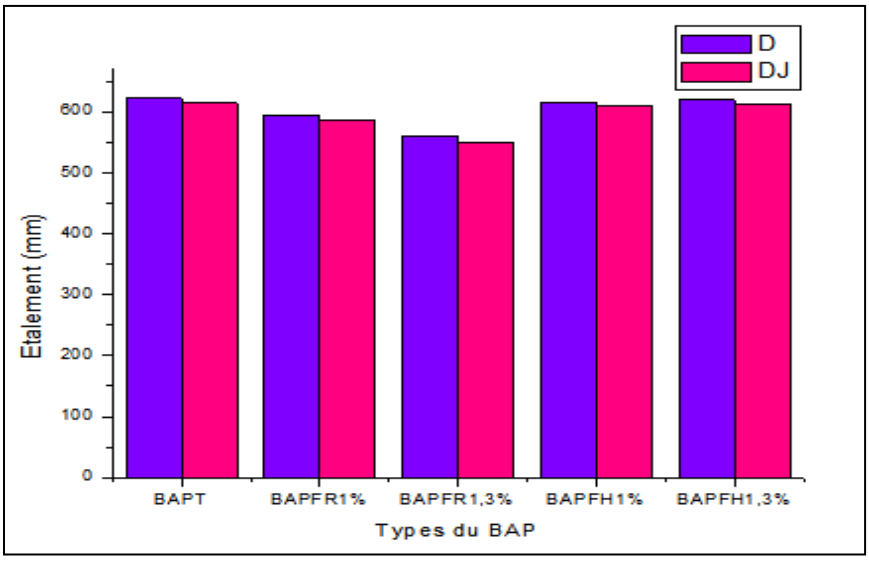



**Figure.III.1:** Effet des fibres végétales sur l'étalement du BAP sans et avec J-Ring.

D'après le tableau III et la figure III.1, on a constaté que l'étalement des bétons autoplaçants fibrés par des régimes de dattes (avec ou sans J-Ring) à diminué a 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 .

Contrairement aux fibres issus de recyclage des sacs de café ; l'étalement n'est pas significatif a cause des difficultés de malaxage, la distribution de ces dernière n'a pas été parfaite a cause de l'accumulation considérable des fibres aux droit des pieds du malaxeur.

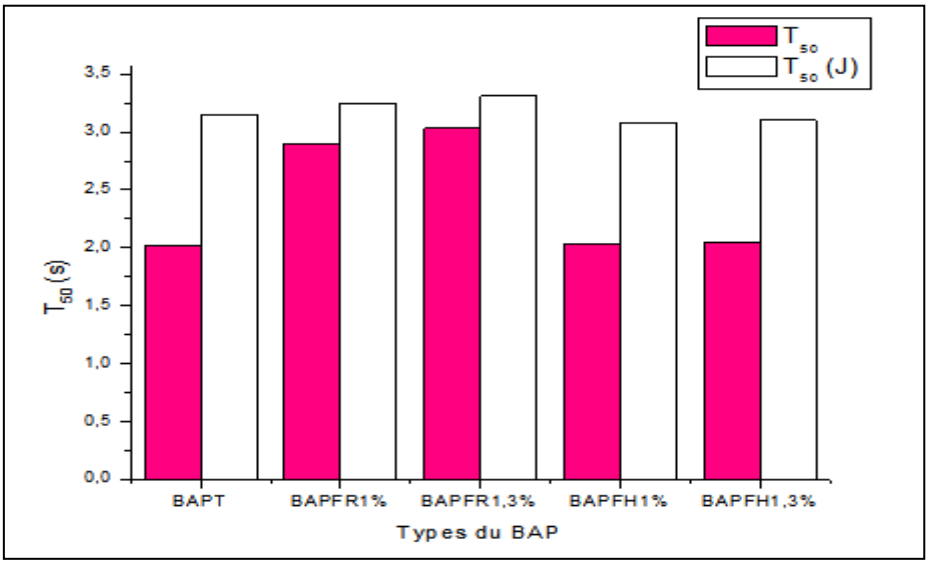



**Figure III.2 :** Effet des fibres végétales sur le temps de passage $T_{50}$ du BAP sans et avec J-Ring.

La figure ci-dessus montre que le temps de passage $T_{50}$ est diminué lorsque on a utilisé le J-Ring ; cela est dû aux accoisement 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, cela est valable pour les fibres de régimes dattiers ,la différence de temps de passage pour le deuxième type de fibres n'est pas significatif à cause des problèmes de malaxage et accumulations de ces derniers aux droits des pieds de malaxeur.

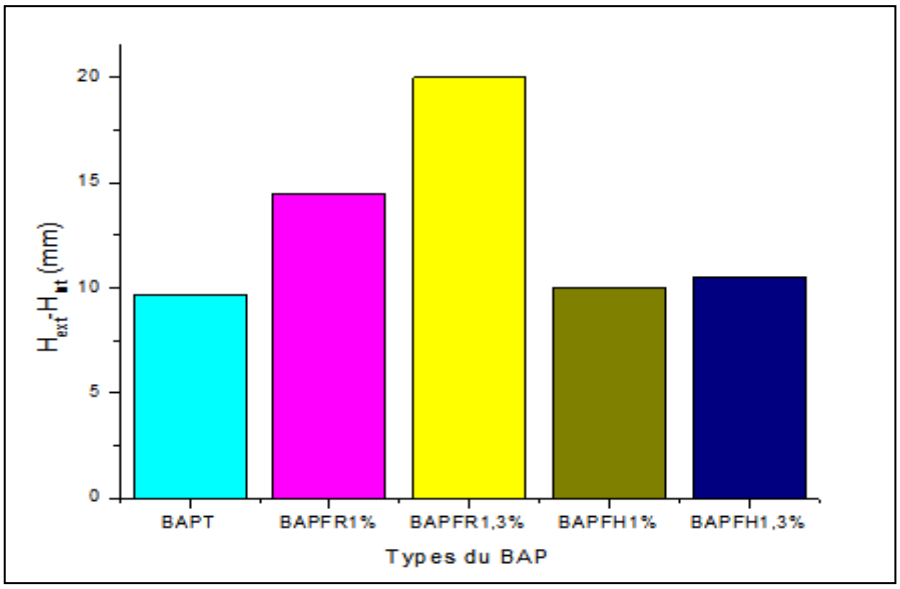



**Figure.III.3:** Effet des fibres végétales sur la différence des hauteurs du BAP à travers (J-Ring).

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. On signale que le béton reste dans la marge du béton autoplaçant.

Le deuxième type de fibre n'a pas été bien malaxé avec le béton, ce qui nous donne une différence des hauteurs semblable au BAPT.

### III.2.B Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement des BAP à travers V-funnel

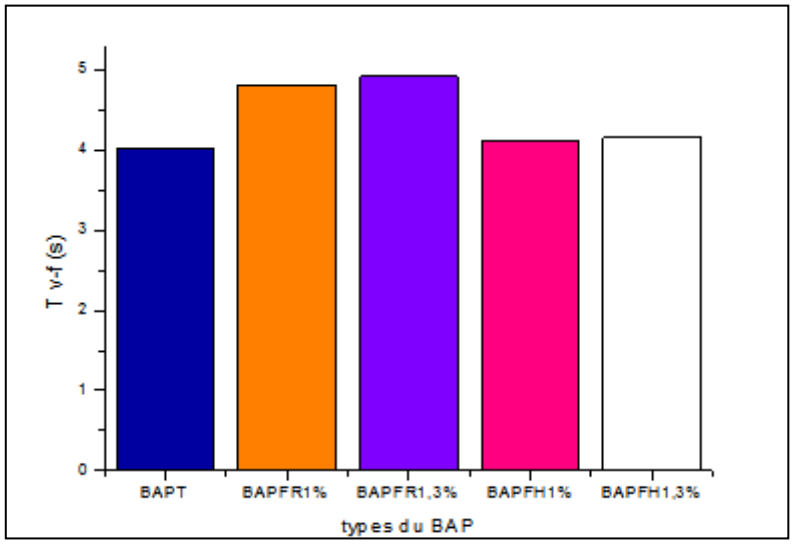



**Figure III.4:** Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement du BAP à travers (V-Funnel).

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 des régimes par rapport au BAPT. Ceci est dû à la diminution de la viscosité du béton.

Pour les BAPFH, on ne constate aucune influence des fibres sur le temps d'écoulement à cause des problèmes du malaxage cité précédemment.

### III.2.C Effet des fibres végétales sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U-Box)

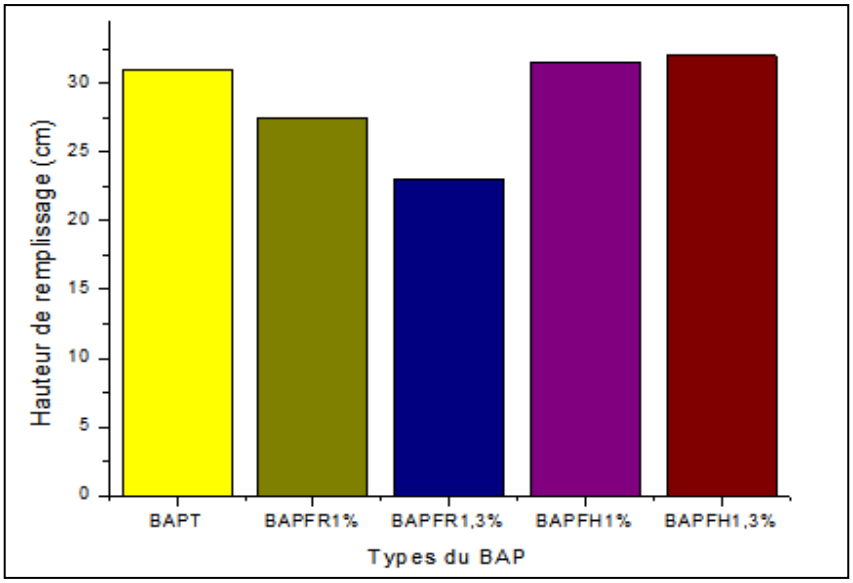



**Figure III.5 :** Effet des fibres végétales sur la hauteur de remplissage du BAP à travers (U-Box).

D'après la figure ci-dessus et le tableau III.1 on remarque que pour les BAPFR plus que le volume des fibres augmente plus l'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.

### III.2.D Effet des fibres végétales sur la résistance à la ségrégation des BAP (stabilité au tamis)

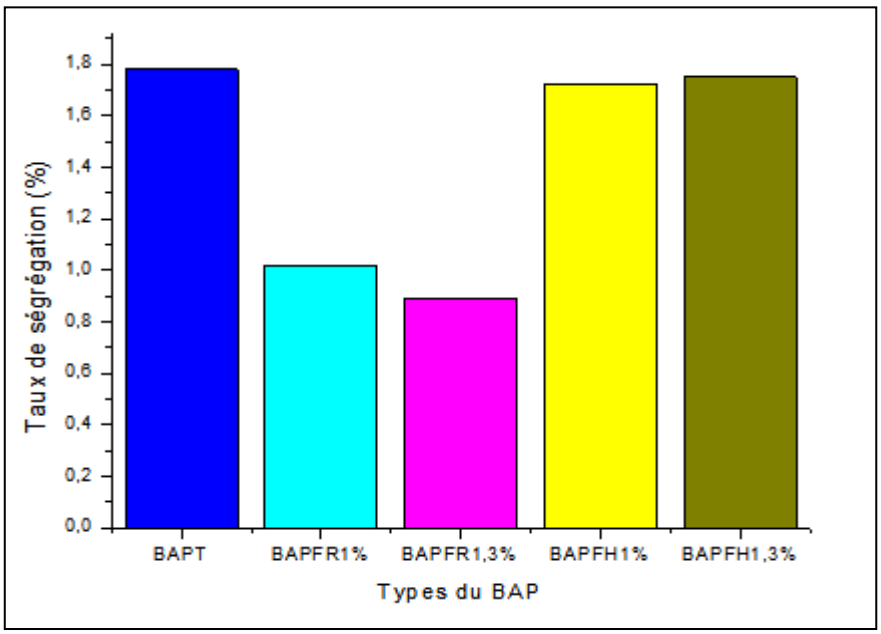



**Figure III.6 :** Effet des fibres végétales sur le taux de ségrégation du BAP.

La figure III.6 montre que plus le pourcentage des fibres des régimes dattiers augmente plus le taux de ségrégation diminue par rapport au BAPT, cela est due à la diminution de la viscosité du béton autoplaçant, ainsi le collage des fibres au niveau des mailles de tamis est un facteur très influant sur le passage de la laitance du béton ; tout en signalant que les résultats restent dans le marge des bétons autoplaçant.

### III.2.E Effet des fibres végétales sur le taux de remplissage et ($T_{20}$, $T_{40}$) des BAP à travers L-Box

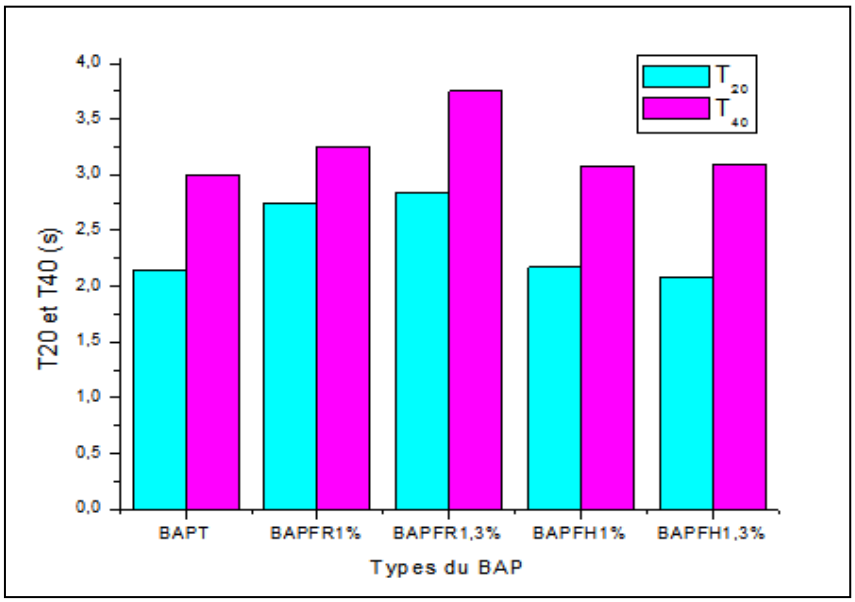



**Figure III.7 :** Effet des fibres végétales sur le temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ à travers (L-Box).

On constate d'après la figure ci-dessus et le tableau III.2 que le temps d'écoulement $T_{20}$ et $T_{40}$ à travers L-Box est diminué, plus on augmente le volume des fibres plus les temps de passage $T_{20}$ et $T_{40}$ augmente.

La diminution de la viscosité des BAP fibrés de régimes dattiers, aussi que le blocage des fibres au droit des armatures affecte l'écoulement du béton, qu'on obtient un temps ($T_{20}$ et $T_{40}$) plus important.

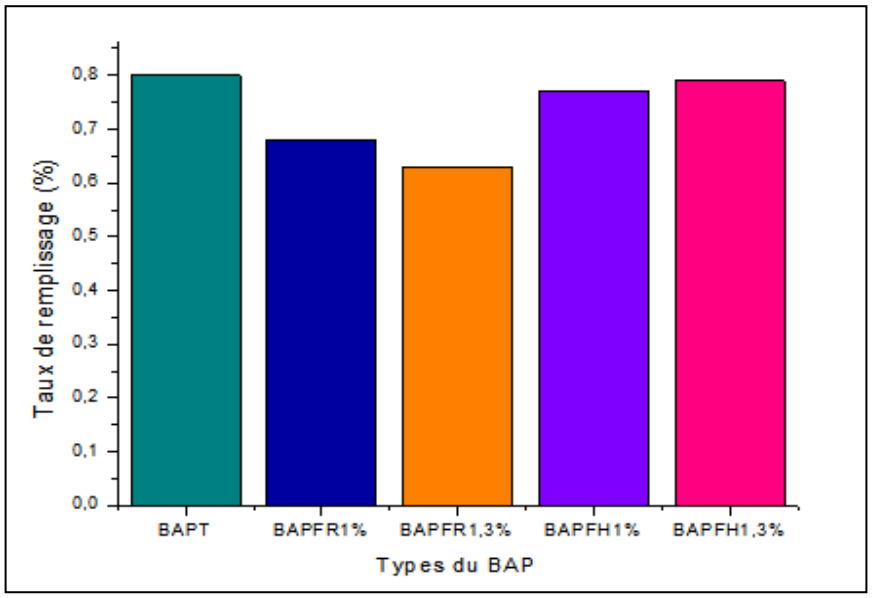



**Figure III.8:** Effet des fibres végétales sur le taux de remplissage ($H_2/H_1$) BAP à travers (L-Box).

Pour les mêmes raisons cités en haut, la capacité de remplissage a été diminue donc plus on augmente le volume des fibres plus la hauteur $H_2$ diminue.

### III.2.F Effet des fibres végétales sur la densité des BAP

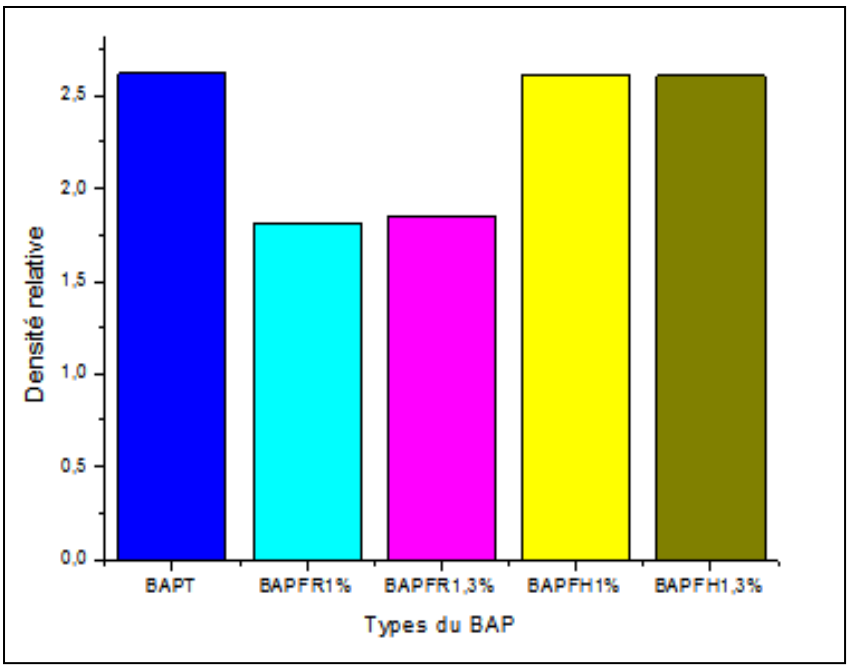



**Figure III.9 :** Effet des fibres végétales sur la densité du BAP.

La substitution d'un volume du béton par un volume des fibres cause une diminution de la densité relative ; la faible masse volumique des fibres est un facteur très influant sur la densité du béton. Donc plus on augmente le volume des fibres plus la densité diminue. Cela semble logique et compatible aux résultats d'autres chercheurs.

### III.2.G Effet des fibres végétales sur l'air occlus des BAP

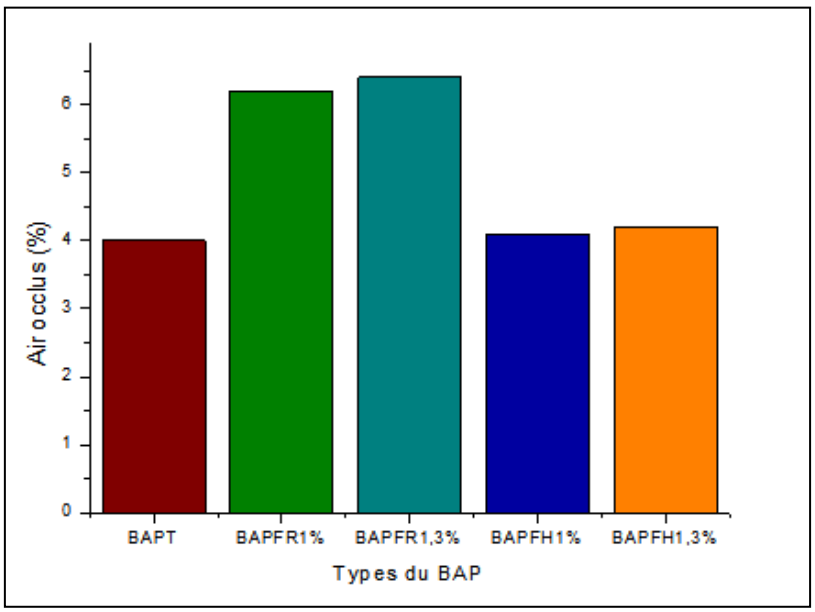



**Figure III.10 :** Effet des fibres végétales sur l'air occlus du BAP à partir l'aéromètre.

L'air occlus est par conséquence affecté par l'incorporation des fibres, plus on augmente le volume des fibres plus le volume d'air augmente. Ceci semble logique tout en comparant avec les résultats d'autres chercheurs; le pourcentage des vides importants à l'intérieur des fibres d'une coté, et l'éventuelle accumulation des bulles d'air sur la surface extérieur des fibres sont le causes de l'augmentation d'air occlus. Ces résultats sont conformés aux résultats de la densité ; si la densité diminue on obtient un matériau moins compacte, donc plus poreux.

## III.3 Essais sur un béton durci

### III.3.1 Effet des fibres végétales sur la vitesse ultrasonique des BAP

**Tableau III.3 :** Résultats des vitesses ultrasoniques du différents BAP.

| | BAPT | BAPFR1% | BAPFR1.3% | BAPFH1% | BAPFH1.3% |
|---|---|---|---|---|---|
| **Temps (j)** | **Vitesse (Km/s)** | **Vitesse (Km/s)** | **Vitesse (Km/s)** | **Vitesse (Km/s)** | **Vitesse (Km/s)** |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **7** | 5,072 | 4,402 | 4,371 | 5,035 | 5,068 |
| **28** | 10,29 | 9,15 | 9,01 | 9,98 | 10,08 |

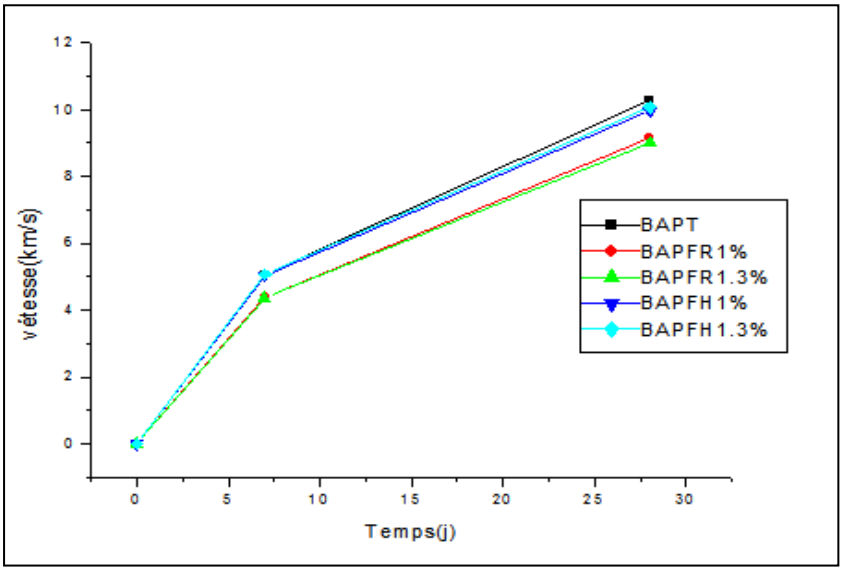



**Figure III.11 :** Effet des fibres végétales sur la vitesse ultrasonique du BAP.

La vitesse de propagation de l'onde ultrasonique nous donne une idée sur la compacité du béton ; plus la vitesse augmente plus le matériau est plus compacte. Dans notre cas, on remarque que la vitesse de propagation est affecté par l'incorporation des fibres où plus le volume des fibres augmente plus la vitesse diminue. A travers des résultats précédents (densité et air occlus) on peut justifier ces résultats ; les BAPFR sont moins compacte et plus poreux, ce qui oblige l'onde électromagnétique de prendre plus le temps pour arriver au récepteur.

### III.3.2 Effet des fibres végétales sur la dureté des surfaces des BAP

**Tableau III.4 :** Résultats de la résistance à la compression à partir le scléromètre du différents BAP.

| | BAPT | BAPFR1% | BAPFR1.3% | BAPFH1% | BAPFH1.3% |
|---|---|---|---|---|---|
| **Temps (j)** | **Rc (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rc (Mpa)** |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **7** | 44 | 29 | 32 | 40 | 42 |
| **28** | 59 | 45,5 | 47 | 56 | 58 |

**Rc** : Résistance à la compression.

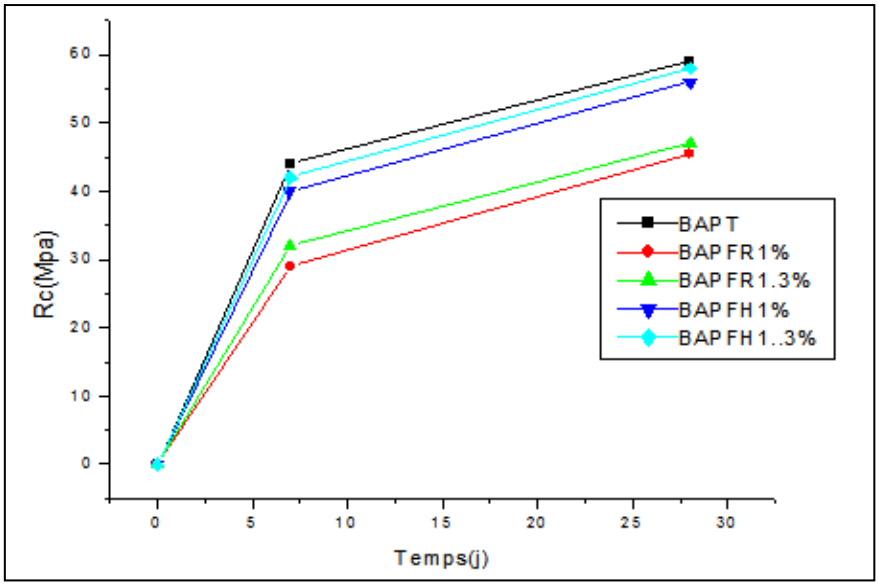



**Figure III.12:** Effet des fibres végétales sur la dureté des surfaces des BAP à l'aide de scléromètre.

L'essai non destructif à travers le scléromètre, nous donne une idée sur la dureté de la surface des BAP. On a remarqué que plus on augmente le volume des fibres plus la dureté diminue ; cela est éventuellement à la pose des fibres derrière une certaine distance de la surface. La différence de la dureté entre le béton et les fibres, peut aussi causer ce genre des problèmes.

### III.3.3 Effet des fibres végétales sur la résistance à la compression du BAP

**Tableau III.5 :** Résultats de Résistance à la compression et traction du différents BAP

| | BAPT | | BAPFR1% | | BAPFR1.3% | | BAPFH1% | | BAPFH1.3% | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Temps (j)** | **Rc (Mpa)** | **Rt (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rt (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rt (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rt (Mpa)** | **Rc (Mpa)** | **Rt (Mpa)** |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **7** | 44,25 | 6,029 | 30,43 | 5,608 | 32,76 | 5,784 | 43,5 | 5,94 | 43,89 | 6,02 |
| **28** | 61,07 | 8,154 | 49,92 | 7,022 | 51 | 7,679 | 60,98 | 7,98 | 60,9 | 8,06 |

**Rc** : Résistance à la compression.

**Rt** : Résistance à la traction.

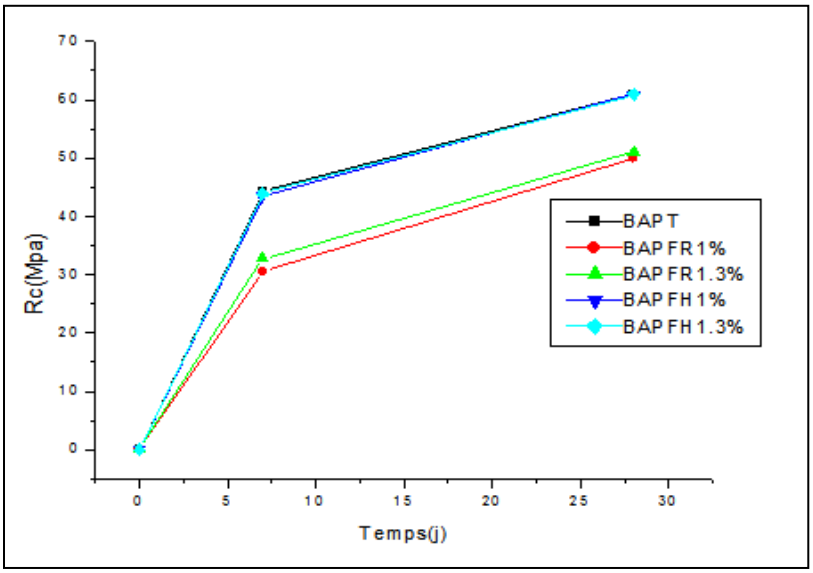



**Figure III.13 :** Effet des fibres végétales sur la résistance à la compression du BAP.

D'après la figure III.13 et le tableau III.5, 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. L'utilisation des fibres à l'état saturé est éventuellement la cause.

Les fibres saturés d'eau engendrent une augmentation de volume, après le malaxage avec le béton et après un certains temps, les fibres gardent une grande quantité d'eau dans un volume important, après le temps de prise , le béton est besoin de plus de l'eau pour l'hydratation du ciment et pour équilibrer l'importante dégagement de la chaleur d'hydratation, ces conditions provoque un séchage des fibres et par conséquence une diminution de volume ; ce qui provoque la naissance d'un nouveau volume de vide dans le béton durci.

### III.3.4 Effet des fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion du BAP

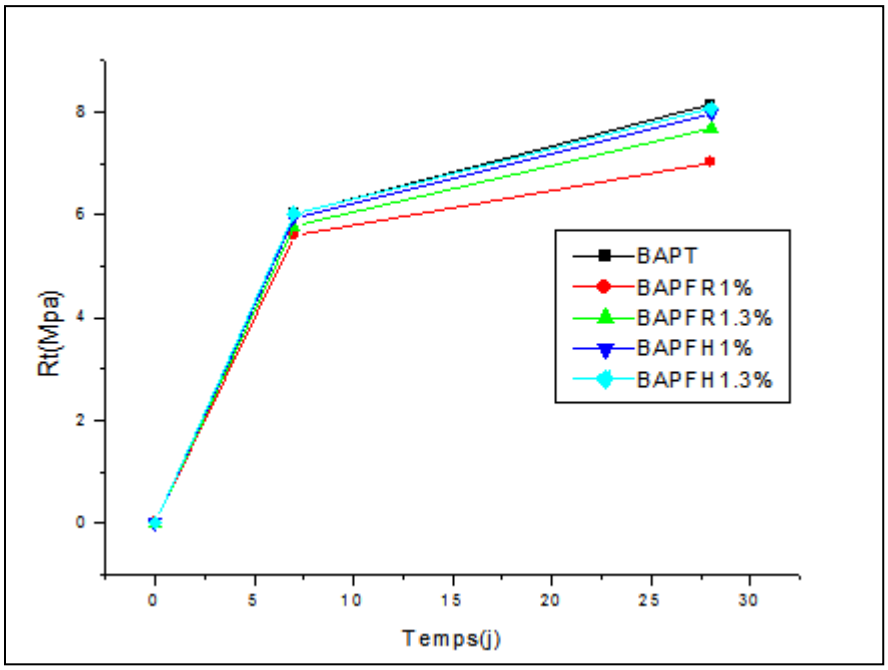



**Figure III.14 :** Effet des fibres végétales sur la résistance à la traction par flexion du BAP.

A cause des critères cité précédemment, on a diminue l'adhérence entre les fibres et le béton. Malgré qu'on ait remarqué que les bétons de fibres sont plus ductiles que le béton témoin, on a obtenu légère diminution de la résistance à la traction. L'éventuelle utilisation des fibres à l'état sec (non saturé), peut améliorer le comportement de ces fibres vis-à-vis la traction par flexion.

### III.3.5 Effet des fibres végétales sur le retrait et le gonflement du BAP

**Tableau III.6:** Résultats de retrait et gonflement du différents BAP.

| | BAPT | | BAPFR1% | | BAPFR1.3% | | BAPFH1% | | BAPFH1.3% | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Temps (j)** | **R** (µm/m) | **G** (µm/m) | **R** (µm/m) | **G** (µm/m) | **R** (µm/m) | **G** (µm/m) | **R** (µm/m) | **G** (µm/m) | **R** (µm/m) | **G** (µm/m) |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **1** | -139,21 | 122,14 | -43,6 | 100,95 | -96,32 | 432 | -129,85 | 119,92 | -132,61 | 123,84 |
| **2** | -182,11 | 178,57 | -89,25 | 117,85 | -107,14 | 521,42 | -179,71 | 160,71 | -185,71 | 176,28 |
| **3** | -207,14 | 182,14 | -82,14 | 335,71 | -296,42 | 735,71 | -203 | 167,85 | -210,71 | 189,57 |
| **7** | -246,42 | 267,85 | -257,14 | 560,71 | -500 | 775 | -241,85 | 256,57 | -245,71 | 248,42 |
| **14** | -267,85 | 314,28 | -339,28 | 596,42 | -546 | 1014,2 | -255,42 | 309,71 | -257,32 | 270 |
| **28** | -307,14 | 353,57 | -435,71 | 635,71 | -703,57 | 1082 | -299,36 | 351,42 | -302,71 | 314,14 |

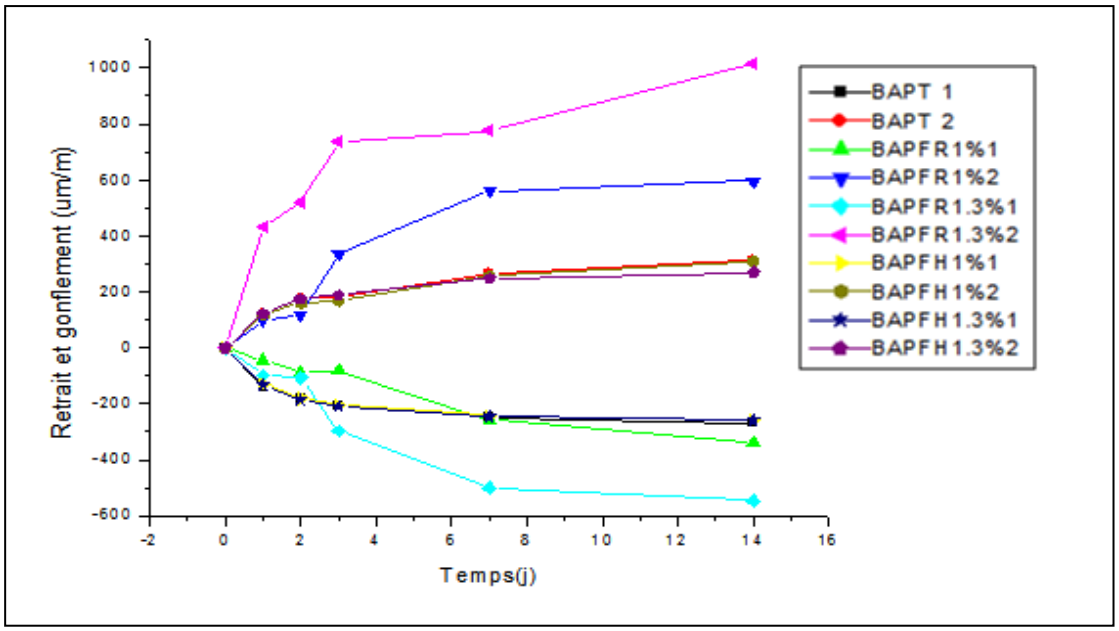



**Figure III.15 :** Effet des fibres végétales sur le retrait et le gonflement du BAP.

**1et R :** Retrait.

**2 et G :** Gonflement.

Le retrait est aussi affecté par l'incorporation des fibres plus on augmente le pourcentage des fibres plus le retrait augmente, cela est du à la mauvaise adhérence du couple (matrice-fibre), et l'important volume d'air à l'intérieur du béton durci. Cela semble logique car plus le volume du vide augmente plus le retrait augmente.

Contrairement au gonflement, plus le pourcentage des fibres augmente plus le gonflement est plus important, le remplissage des vides par l'eau provoque une augmentation de volume du béton. Par conséquence des importantes valeurs de gonflement.

### III.3.6 Effet des fibres végétales sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP

**Tableau III.7:** Résultats de l'absorption d'eau du différents BAP.

| | **BAPT** | **BAPFR1%** | **BAPFR1.3%** | **BAPFH1%** | **BAPFH1.3%** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Temps (s)** | **Eau absorbé ($g/m^2$)** | **Eau absorbé ($g/m^2$)** | **Eau absorbé ($g/m^2$)** | **Eau absorbé ($g/m^2$)** | **Eau absorbé ($g/m^2$)** |
| **0** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **3,46** | 0,06 | 0,2 | 0,55 | 0,05 | 0,07 |
| **5,47** | 0,46 | 0,3 | 0,62 | 0,39 | 0,49 |
| **7,74** | 0,57 | 0,34 | 0,64 | 0,47 | 0,48 |
| **10,95** | 0,74 | 1,29 | 1,33 | 0,67 | 0,68 |
| **15,49** | 0,97 | 1,7 | 2,98 | 0,87 | 1,01 |
| **37,94** | 2,73 | 3,78 | 4,25 | 1,78 | 3,21 |

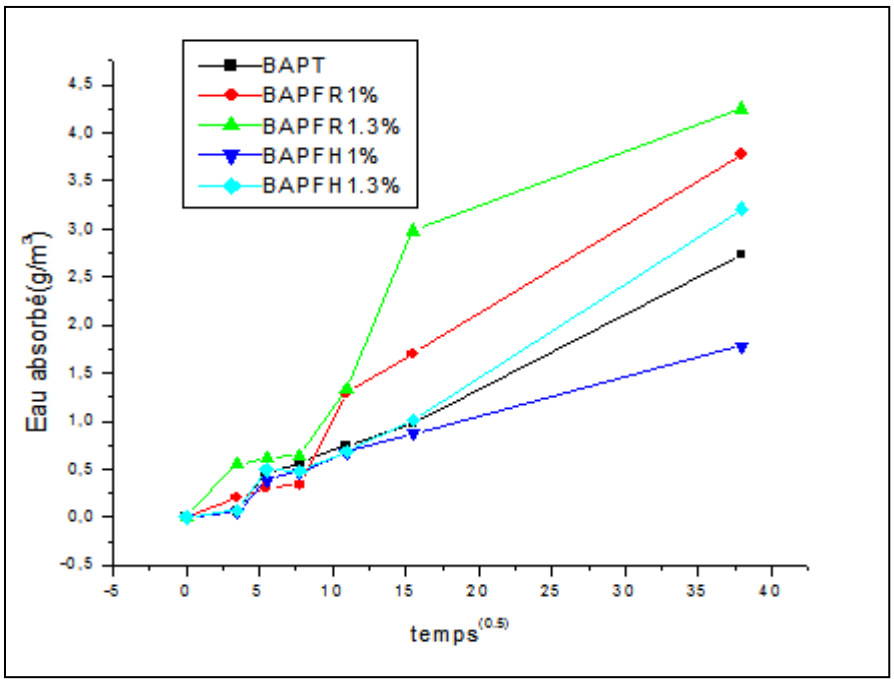



**Figure III.16 :** Effet des fibres végétales sur l'absorption d'eau par capillarité du BAP.

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 important.

## III.4 Conclusion

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Les BAP à base des fibres d'halfa ne présentent aucune amélioration soit à l'état durcis où à l'état frais à cause d'une accumulation des fibres aux pieds du malaxeur en cours de malaxage.
- les caractéristiques des BAP à base des fibres des régimes à l'état frais par rapport au BAP témoin :

- ✓ Le temps d'écoulement et d'étalement est très long.
- ✓ La capacité de passage des bétons est nettement faible.
- ✓ La capacité de remplissage au milieu confiné est faible car il a affecté par l'incorporation des fibres.
- ✓ Le pourcentage de l'air occlus est élevé.
- ✓ La densité est diminuée.
- ✓ Bonne résistance à la ségrégation.
- ✓ Une diminution de la viscosité.

- Les caractéristiques des BAP à base des fibres des régimes à l'état durci par rapport au BAP témoin :

  - ✓ Diminution de la résistance à la compression, tout en restant dans le marge des bétons résistants.
  - ✓ Légère diminution de la résistance à la traction.
  - ✓ Absorption d'eau par capillarité plus important.
  - ✓ Un retrait et un gonflement important.

Ces résultats sont très logiques et comparables aux résultats d'autre recherche.

# CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

## CONCLUSIONS

Depuis le début du 20ème siècle, le béton s'est imposé comme matériau de base dans de nombreuses constructions (bâtiments, ouvrages d'art, etc.). Dès lors, différents phénomènes mal appréhendés initialement, ont conduit à la recherche systématique des mécanismes élémentaires et leur interaction. L'intérêt croissant pour les nouveaux bétons et leur utilisation dans beaucoup de domaines du génie civil, a fait que nous avons voulu apporter une nouvelle approche pour la conception d'un nouveau produit consistant en un béton autoplaçant renforcé de fibres végétales recyclées. Ces fibres se trouvant être des déchets locaux.

Pour améliorer les solutions technologiques existantes en termes de volume, de poids et de résistance, nous avons réalisé une fiche technique de ces bétons autoplaçants faisant une étude de caractérisation avec une comparaison un BAP sans fibres avec des BAP renforcé de fibres végétales.

Dans la première partie, nous avons donné une idée exhaustive sur le béton et ces types, béton autoplaçant (formulation, propriétés, les essais effectués, la mise en œuvre…), béton ordinaire fibré, béton autoplaçant renforcé de fibres végétales. Aussi bien en termes de volume qu'en termes de finances, les bétons constituent les matériaux les plus utilisés dans le bâtiment. Essentiellement, les bétons sont confectionnés au départ de gravier, de sable, de ciment et d'eau. Mais à part ces quatre composants fondamentaux, les bétons actuels contiennent de plus en plus d'additifs et d'adjuvants. Ces derniers permettent de modifier les caractéristiques des bétons de telle manière que ceux-ci, même si la dénomination « béton » reste d'application, peuvent être considérés comme des matériaux nouveaux. Les évolutions au niveau du matériau béton ont entraîné de nouvelles applications dont l'impact ne peut être sous estimé.

Le deuxième chapitre est l'établissement d'une fiche « d'identification » ou de caractérisation des cinq mélanges utilisés. Les résultats obtenus permettent d'établir une comparaison du point de vue composition des mélanges, du point de vue résistances à la compression, à la traction par flexion des bétons. La caractérisation des bétons autoplaçants utilisés pour notre recherche est indispensable pour l'obtention d'un matériau ayant la fluidité adéquate permettant une bonne mise en œuvre. La détermination des différentes résistances permet d'avoir une idée sur le comportement des différents bétons en fonction des renforts introduits.

L'intérêt de ce chapitre est définir une fiche technique ou « carte d'identification » du matériau. la caractérisation mécanique nous semble-t-il un passage obligé pour continuer l'étude comparative. Cela nous amène à poursuivre en nous intéressant au comportement des matériaux utilisés ce qui permettra d'avoir plus de renseignements quant au fonctionnement et à la valorisation des bétons autoplaçants renforcés de différentes fibres.

Le dernier chapitre consiste à visualiser les résultats correspondants, puis les interpréter pour donner une idée sur le fonctionnement des fibres dans la matrice du béton autoplaçant.

**RECOMMENDATIONS**

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des développements futurs dans le domaine du recyclage des fibres végétales. Pour cela on recommande les gens de prendre en compte les points suivants :

- ✓ Utiliser les fibres de régimes dattiers sous l'état sec ou humide, cela peut améliorer l'adhérence (mortier-fibre) ;
- ✓ Traiter ces fibres pour améliorer leurs adhérences avec la matrice cimentaire.
- ✓ Une diminution de la longueur des fibres peut améliorer le comportement des BAP à l'état frais et durci.
- ✓ Eviter d'utiliser les fibres issu de recyclage des sacs d'halfa, où bien les traiter pour avoir un meilleur comportement lors du malaxage ;
- ✓ Penser à utiliser d'autres fibres végétales comme un renfort dans les BAP.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

# REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE


**[1] ABDELLAHELHADJ A, IRKI I.**

« L'influence des fibres métallique sur le comportement mécanique du béton», mémoire master, Université de Médéa,. p 03-04. Juin 2011.

**[2] NEVILLE A. M.**

« Propriétés des bétons. » Paris. Eyrolles. 806 pages.

**[3]WITTMANN F. H.**

« Propriétés de la pâte de ciment durcie. » Septième congrès international de la chimie des ciments : rapports principaux, Paris. 1980, Vol. I, Sous thème VI-2, 16 pages.

**[4] BERRA M.., CASTELLANI A.**

"Toughness of old plain concretes." In : Wittmann Eds. Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS – 2, Zurich. Freiburg: Aedificato publishers. 1995, Vol. I, p. 85 – 94.

**[5] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi.**

«Self-compacting concrete». Structural Concrete, 17, March 2000.

**[6] Ozawa. K, et. al.**

«Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

**[7] C. Ozyildrim, D.S. Lane.**

« Investigation of Self Compacting Concrete », Virginia Transportation Research Council, 2003.

**[8] K.Ozawa, S.Tagtemsirikul, and K.Maekawa.**

«Role of materials on the filing capacity of fresh concrete», In Proceedings of The Fourth CANMET and ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

**[9] Ozawa. K, et. al.**

«Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

**[10] M. Ouchi.**

«Self Compacting Concrete Development, Applications and Investigations», Kochi University of Technology, Japan.

**[11] F.Buyle, Bonin.**

«Bétons autoplaçants ».

**[12] Jean-christophe Braquenier.**

«Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

**[13] P. TURCRY**.

« Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes - Université de Nantes, 2004.

**[14] CHEKHTOUHAMI M.A.**

« Étude de l'influence des différents superplastifiants sur les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton fluide (autoplaçant) » mémoire master, Université de Médéa. P 04 et 11,Juin 2012.

**[15]** Caracteristiques du beton autoplaçant a l'etat frais et a l'etat durci (R.Mohamed Krachaï(1) , A. Benaissa(2)Et K.Ayed (3) (1)Et (2 ) Département De Génie Civil D'université Usto D' Oran. (3) Département De Génie Civil De L'enset D'oran.).

**[16] G.Dreux, J.Festa.**

«Nouveau Guide du Béton et Ses Constituants », 8ème Edition, Edition Eyrolles.1998.

**[17] Baron J., Ollivier J.P.**

« Les bétons – Bases et données pour leur formulation », Editions Eyrolles, 1996.

**[18] K.H. Khayat.**

« Optimisation et caractérisation des bétons autoplaçants pour coffrages fortement armés » séminaire sur l'Evolution de technologie du béton, Hôtel Sheraton – Club des Pins 23 Juin 2002.

**[19] P.L.Domone, Chai H-W and J.Jin**.

«Optimum mix proportioning of SCC», September 1999.

**[20] M. El Barak.**

«Contribution de l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçant à l'état frais», thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2005.

**[21] Z.E.Abib**.

« Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçants », Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Juillet 2004.

**[22] A. Tagnit-Hamou.**

« Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons », Note de cours GCI 712, Université de Sherbrooke, Canada, 2001.

**[23] RILEM.**

« Self Compacting Concrete», State-of-the-Art report of Rilem Technical Commite 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°, Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L.

**[24] AFGC.**

« Béton Autoplaçants : Recommandations Provisoires », Document Scientifiques et Techniques, AFGC, Juillet 2000.

**[25] T. Noguchi, S.G Oh, F. Tomosawa,**

« Rheological approch to passing ability between reinforcing bars of self-compacting concrete », Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, suede, pp. 59-70, 1999.

**[26] Thierry Serdan.**

« Les Béton Autonivelants (BAN) Synthèse Bibliographique», Liaison Labo P et Ch 196, PP 53-60, Mars-Avril 1995.

**[27]** « Bétons Auto-plaçants », Recommandations Provisoires, Document Scientifiques et Techniques, ISSNencours, Juillet 2000.

**[28] RILEM.**

« Self Compacting Concrete», State-of-the-Art report of Rilem Technical Commite 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°,Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L.

**[29]** La Technologie du Béton (Guillaume Francqueville Chef de Marchés BPE / PREFA / Travaux Souterrains.

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

**[31] H. Fujiwara , Nagataki, N. Otsuki and E.Endo.**
«Study on reducing unit powder content of high fluidity concrete by controlling powder particle size distribution », Conc lib of Japan Soc of Civ. Eng. 28, December 1996, 117-128.

**[32] T. Nawa, T. Izumi, Y. Edamatsu.**
«State- of- the-art- report on materials and design of self compacting concrete» Proc of Int. Workshop on Self-compacting Concrete, ed K. Ozawa and K. Ouchi, Kochi University of Technology, Japan, August 1998, 166-190.

**[33] H.Chai.**
« Design and testing of SCC» Ph.D thesis, University of London, April 1998.

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

**[35] ENFAC, SCC.**
« Specification and guidelines for SCC» Février2002.

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

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

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

**[39] J. Ambroise , S.Rols, J.Péra.**

« Self-leveling concrete – Design and properties», Concrete Science and Engineering, 1, pp. 140-147, septembre 1999.

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

**[41] Jolicoeur C., Simard M.A.**

« Chemical Admixture-Cement Interactions : Phenomenology and Physico-chemical Concepts », Cement and Concrete Composites, 20, pp. 87-101, 1998.

**[42] TRUDEL Alain.**

Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Avril, 1996.

**[43] De Larrard F. et Le Roy R.**

« Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », Matériaux et Constructions, 25, pp. 464-475, 1992.

**[44] Pera J., Husson S. and Guilhot B.**

« Influence of finely ground limestone on cement hydration », Cement and Concrete Composites, pp. 99-105, 1999.

**[45] Shi C., Wu Y., Shao Y. and Riefler M.**

« Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete », ACBM center, pp. 349-354, 2002.

**[46] S. Assié., G. Escadellas, G. Marchese**.

« Durability of self-compacting concrete » 3rd International Symposium on Self Copacting concrete, pp 665-662, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.

**[47] H. Gram, P. Piparinen.**

« Properties of SCC – Especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance», Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 211-225, 13-15 Septembre 1999.

**[48] S. Assié.**

« Durabilité des bétons autoplaçants », Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, 2004.

**[49]** Projet national de recherche CERIB, « Béton Autoplaçant BAP », France, Octobre 2001.

**[50] J. Trägardh**.

« Microstructural features and related properties of self-compacting concrete», Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 175-186, 13-15 September 1999.

**[51] Jean-christophe Braquenier**.

« Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

**[52] P.Turcy, A.Loukili.**

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

**[53] RILEM**

« Self Compacting Concrete», State-of-the-Art report of Rilem Technical Commite 174-SCC Self Compacting Concrete Edited by A°,Skarendhal and Ö.Petersson, RILEM Publications S.A.R.L.

**[54] ARABI N.**

« Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite ciment verre et durabilité des fibres de verre » Thèse doctorat Université de Annaba 2006. 191 pages.

**[55] MINART J. HOANG L.H. & TACHE G.**

« Le béton de fibres. » Rapport bibliographique. Paris. Centre d'étude du bâtiment et des travaux publics.

**[56] SHAH S.P., RANGAN B.V.**

"Fibre reinforced concrete properties. ACI Journal. February 1971. p. 126-135.

**[57] KHENFER, M. M.**

«Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques». Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.

**[58] SWAMY, R. H. S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S.**

«Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers». The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1, 1984.

**[59] SAVASTANO, Jr.H., AGOPYAN,V.**

«Transition zone studies of vegetable cement paste composites ».cement and concrete, composites , 21, pp.49-57, 1999.

**[60] NILSON, L.**

« Reinforced Concrete with Sisal and other vegetable fiber».
Swedish Council for Building Research, document D14, 1975.

**[61] AYYAR, T.S.R. and MIRIHAGALLA, P.K.**

«Elephant grass fibers and reinforcing fiber» .Magazine of Concrete Research , Vol. 28, pp.162-67, 1976.

**[62] COUTTS, R.S.P.**

«Flax fibers as a reinforcement in cement mortar», the international journal of cement composites and lightweight concrete, vol.5 N°4,pp 257-262, 1983.

**[63] KRIKER. A.**

«Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec».
Thèse de doctorat d'état, ENP, Alger, 2005.

**[64] BLEDZKI, A. K and GASSAN. J.**

«Composites reinforced with cellulose based fibers » ,ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.

**[65] AIT AMEUR, M.M.**

«Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales ».Mémoire de magister, U Tiaret, 1998.

**[66] TOLËDO, F.R.D., SCRIVENER, K. ENGLAND, G.L., GHAVAMI, K.**

« Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites »ELSEVIER, Cement and concrete composite, volume 22, pp.127-143, 2000.

**[67] LACROIX, R., FUENTES, A. et THONIER, H.**

« Traité de béton armé » Édition EYROLLES Paris, 1982

**[68] TOLËDO, F. R.D, GHAVAMI, K., ENGLAN, D. G. L, SCRIVENER, K.**

« Development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability ».
ELSEVIER, Cement and concrete composite, volume 25, p12,2003.

**[69] ABBANI, S.**

«Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier».Mémoire de magister, université de Ouargla, 2003.

**[70] SWAMY,R.N.**

«Properties of high-strength concrete »Cement concrete and agreagates vol.8,N°1, pp.33-41,1986.

**[71] ROSSI P., HARROUCHE N., BELLOC A.**

« Méthode de composition des bétons de fibres métalliques. » Annales ITBTP, n°475. Juin – Juillet 1989. Série : BETON 266.

**[72] BARON J., LESAGE R.**

« La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier. » Rapport de recherche LPC, LCPC, Paris, n° 64, Décembre 1976.

**[73] ROSSI P.**

« Les bétons de fibres métalliques. » Presses de l'ENPC. Juin 1998.

**[74] Elhillali A.**

«Etude expérimentale de la rhéologie et de la comportement des BAP : influence des fines calcaires et des fibres végétales. » université de Cergy- Pontoise, Décembre 2009.

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

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

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

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

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

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

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

**[82]** MEDAFLOW 30 Conforme à la norme AN 934-2 :TABB 1 , TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

**[83] NF EN 12350-7**, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air occlus », AFNOR.

**[84] NF EN 12504-4** 2005, *« Essais pour béton dans les structures. Partie 4 :Détermination de la vitesse de propagation du son », AFNOR.*

**[85] NA 5027**, 1997, béton auscultation sonique-mesure du temps de propagation d'onde Soniques dans le béton.

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

**[87] NA427** ,1989 «Détermination de la résistance a la compression des éprouvettes» Norme algérienne.

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

**[89] NF P 18-407**,2003 «Essai pour béton durci. Partie 4 : Résistance à la traction des éprouvettes », AFNOR.

# REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**[90] NA 442,** Normes Algérienne : « Ciment - Composition, spécifications et critères de Conformité des ciments courants », 1994, 2000.

**[91] Fiche technique** : « Ciment MATINE CEM II/A 42.5 », Alger 2009.

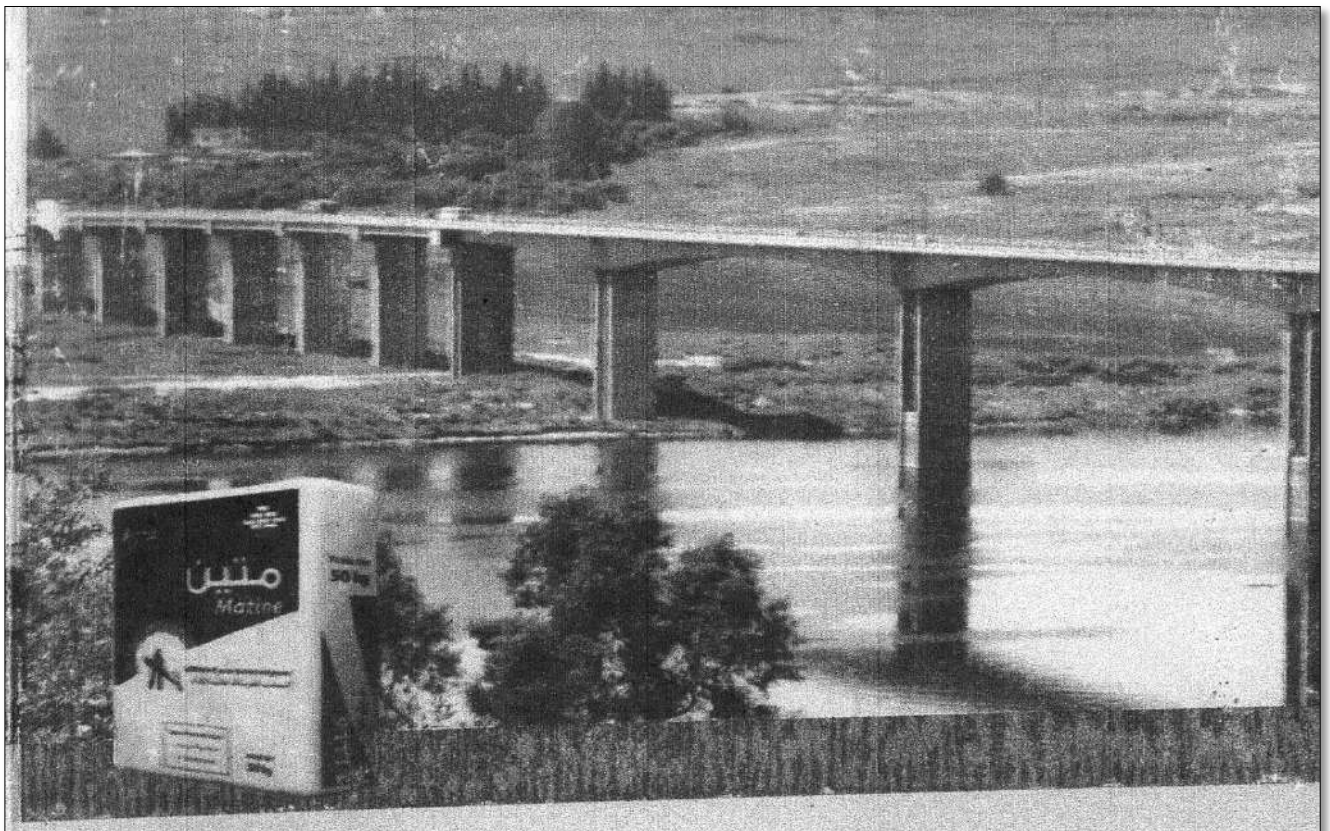
**[92] ASTM C293**. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam With Center-Point Loading." Annual book of ASTM standards.

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

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

# ANNEXES

# ANNEXE A




*Ciment*

# MATINE

**Ciment pour béton exigeant**

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.

| | CIMENT | SABLE (sec) | GRAVILLONS (sec) | EAU (litres) |
|---|---|---|---|---|
| Ouvrage simple en béton armé (B30) | x | + 0/5 | + 8/25 mm | + 25ℓ |

**Remarque :** Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en œuvre.

LAFARGE
لافارج

**MATINE**

**Ciment pour béton exigeant**

**CEM II/A 42.5 R NA 442**

## FICHE TECHNIQUE

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice ($SiO_2$) à caractère acide. On trouve également l'alumine ($Al_2O_3$) et le fer ($Fe_2O_3$). ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°c. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94 .

**Domaine d'utilisation :**

MATINE est utilisé pour tous les projets courants qui nécessitent des hautes résistances mécaniques mais ne présentent pas un besoin spécifique dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .ect) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de désallement,..ect) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

ANNEXE B

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 9

# MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2:TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774.

**Super plastifiant**

**Haut réducteur d'eau**

## DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates d'Ether 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.

## DOMAINES D'APPLICATION

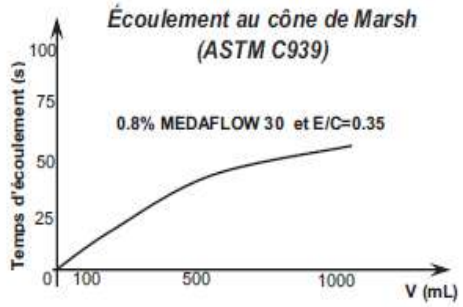
- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

## PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très faible
- Amélioration considérable de la fluidité
- Une très bonne maniabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton




Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait et le risque de fissuration

| Désignation | Rc (MPa) | | |
|---|---|---|---|
| | 3J | 7J | 28J |
| MEDAFLOW 30 (1.4%) | 39.2 | 54.7 | 62.2 |

## CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Brun clair
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité ..... 1,07 ± 0,01
- Teneur en chlore ..... < 0,1 g/l
- Extrait sec ..... 30%

## 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.

**DOSAGE**

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.85 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

## CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

*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.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com*

## C. Exemple de calcul de la composition du béton

### C.1 Les données

- Pour un volume de béton de V=20 litres (par exemple)
- **Masses volumiques**
  - Masse volumique apparente du gravier (on prend l'exemple du gravier roulé) : $\rho_G$ =1426kg/m$^3$
  - Masse volumique absolue du gravier (gravier roulé) : $\rho_{AG}$ = 2560kg/m$^3$
  - Masse volumique absolue du sable : $\rho_S$ = 2500kg/m$^3$
  - Masse volumique absolue du ciment : $\rho_C$ =3150kg/m$^3$
- **Coefficients d'absorption**

➢ Coefficient d'absorption du sable : $A_{bS}$ = 0.5

➢ Coefficient d'absorption du gravier : $A_{bG}$ = 2.18

- Le rapport Sable/Mortier : S/M = 0.52
- Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_G \times 50}{100}$$

- Le volume d'air dans le béton en pourcentage : A=1% du volume du béton
- Le rapport Eau/Ciment est de $E/C_{volume}$=1.26 par unité de volume de ciment et $E/C_{poids} = E/C_{volume} / \rho_C = 0.40$ par unité de poids de ciment.
- Le pourcentage de superplastifiant (**MEDAFLOW30**) : %Sp= 1% du poids de ciment, le **MEDAFLOW30** est de 30% d'extrait (donc il contient 70% d'eau).

### A.2 Calcul d'humidité

Comme on doit calculer l'humidité du sable pour la composition du mortier, dans la composition du béton on doit calculer l'humidité du sable et du gravier aussi pour apporter les corrections nécessaires à la formulation.

On prend un échantillon de sable de masse $M_1$ et un échantillon de gravier de masse $M'_1$ et on les met dans l'étuve réglée à 105°C pour une durée de 6minutes pour le gravier et une durée de 8minutes pour le sable, puis on pèse $M_2$ et $M'_2$ les masses respectives du gravier et du sable.

L'humidité du sable : $\mu_S = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$

L'humidité du gravier : $\mu_G = \frac{M'_1 - M'_2}{M'_2} \times 100$

## C.3 Calcul des différents composants

### C.3.1 Gravier

La quantité **G** en kg du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(kg) = \frac{G(kg/m^3) \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_G - A_{bG}}{100}\right)$$

### C.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (**%G**), le pourcentage du mortier par rapport au béton (**%M**) puis le pourcentage du sable dans le béton (**%S**) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (**S**) :

Le pourcentage du gravier dans le béton :

$$\%G = \frac{G(kg/m^3)}{\rho_{AG} \times 10}$$

Le pourcentage du volume de mortier par rapport au volume de béton :

$$\%M = 100 - \%G - \%A$$

Le pourcentage du sable dans le béton :

$$\%S = \frac{\%M \times S/M}{100}$$

Quantité du sable **S** en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{\%S \times \rho_{AS} \times V}{1000}\left(1 + \frac{\mu_S - A_{bS}}{100}\right)$$

D'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

### C.3.3 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (**%P**) :

$$\%P = \%M - \%S$$

Pourcentage de ciment dans le béton (**%C**) :

$$\%C = \frac{1}{1 + E/C_{volume}} \times \%P$$

La quantité de ciment **C** en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = \%C \times \rho_C \times 10 \times \frac{V}{1000}$$

### C.3.4 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton **Sp** (kg/m$^3$)

$$Sp(kg/m^3) = \frac{\%Sp}{100} \times \%C \times \rho_C \times 10$$

La quantité de superplatifiant **Sp** en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3) \times V$$

### C.3.5 Eau :

L'eau ajoutée au béton (**E**) est divisée en deux partie : la première partie (**$E_1$**) est de 70% de (**E**) elle est ajoutée durant la première minute de malaxage et la deuxième partie (**$E_2$**), elle de 30% de (**E**) est ajoutée au superplastifiant est l'ensemble est ajouté au mélange du béton durant la deuxième minute de malaxage.

Le pourcentage d'eau dans le béton (**%E**) :

$$\%E = \frac{E/C_{volume}}{1+E/C_{volume}} \times \%P$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau 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 contenue dans le superplastifaint : $e_3$

$$e_3 = \frac{Sp(kg) \times 80}{100}$$

L'eau à extraire e :

$$e = e_1 + e_2 + e_3$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume Vde béton :

$$E(kg) = \frac{\%E \times 10 \times V}{1000} - e$$

Avec :

**Eau1** $E_1(kg) = 0.70 \times E$

**Eau2** $E_2(kg) = 0.30 \times E$

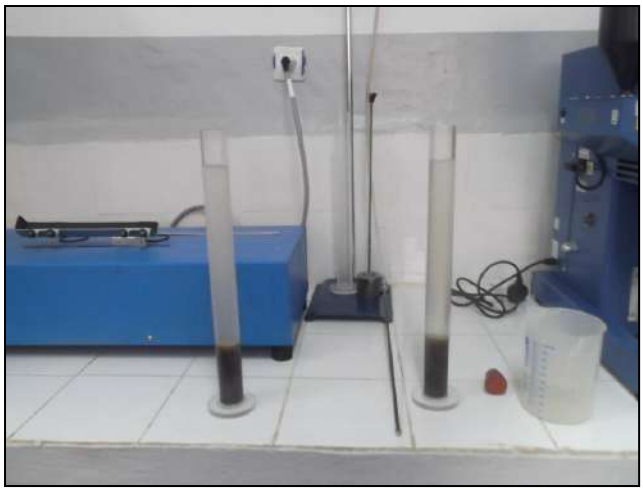


**Fig. 1** : Essai de l'équivalent de sable



**Fig.2** : Essai de la masse volumique du sable.

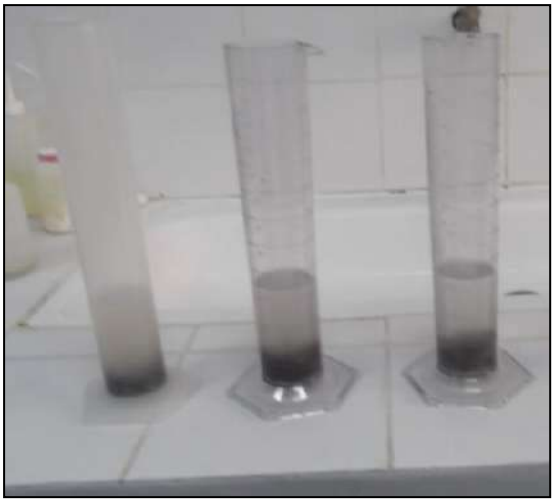


**Fig. 3** : Essai de la masse volumique du gravier.

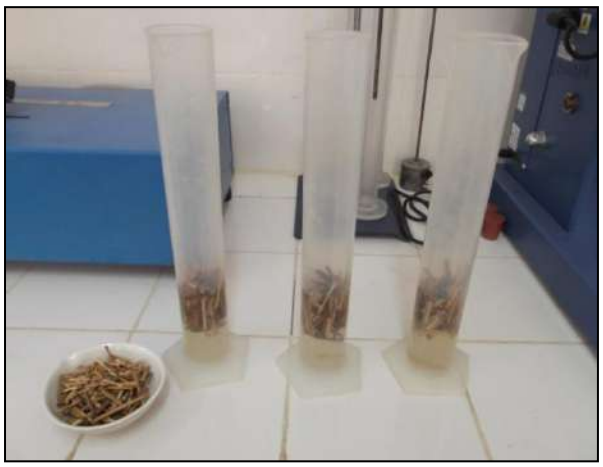


**Fig. 4** : Essai de la masse volumique des fibres « Régime ».



**Fig. 5** : Essai de la masse volumique des fibres « Halfa ».