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'Etude

Pour l'obtention du diplôme Master en Génie Civil

Option : Structures

THEME

MORTIER AUTOPLAÇANT A BASE DES FIBRES VEGETALES (palmier dattier)

Réalisé par

M^{elle} Euldji Meriem

M^{elle} Bensaber Hafidha

Encadré par

Dr. DEBIEB Farid

Co-encadré par

Mr. IRKI Ilyes

PROMOTION: JUIN 2015

Remerciements …



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

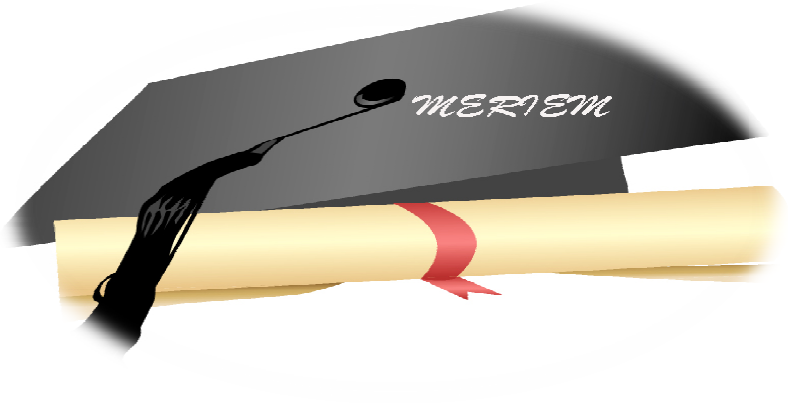


- *Tout d'abord, On remercie dieu "Allah" Miséricordieux le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*
- *On adresse nos remerciements à notre promoteur de mémoire,* ***Dr. DEBIEB Farid,*** *On le remercie de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*
- *ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de* ***Mr. IRKI Ilyes*** *'', on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*
- *Et sans oublier à remercier la responsable du laboratoire génie civil Melle BOUKHELKHAL Djamila, qui a permis le bon déroulement des expériences du début jusqu'à la fin.*
- *Nos profonds remerciements vont également à toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenue de prés ou de loin.*

Merci ….



meriem & hafidha



A cœur vaillant rien d'impossible ….A conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre …..Tout vient à point à qui sait attendre

Quand il y a le souci de réaliser un dessein ….Tout devient facile pour arriver à nos fins

Malgré les obstacles qui s'opposent ….En dépit des difficultés qui s'interposent

Les études sont avant tout …..Notre unique et seul atout

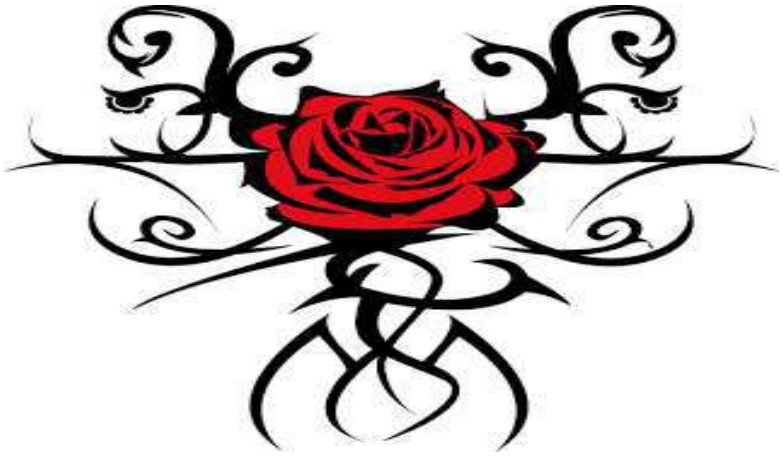
Ils représentent la lumière de notre existence …..L'étoile brillante de notre réjouissance

Comme un vol de gerfauts hors du charnier natal …Nous partons ivres d'un rêve héroïque et brutal

Espérant des lendemains épiques …..Un avenir glorieux et magique

Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis

Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri



Je dédie ce mémoire …

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE ....



Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A MON TRÈS CHER PÈRE...

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation

A MES TRÈS CHÈRES SŒURS...

Amina, Rekia ,Amira ,Imene et Hadjer. *Sans oublier ma nièce* ***zinouba***

A MES CHÈRES AMIES

Insaf, Nassima, Kheira, Zahira , Islam , Mohamed , Siham , Wissam , Nassrin

A MA CHÉRIE ET MON BINÔME ...

Hafidha et sa famille

A mes amies de promotion génie civil 2015 pour tous les moments vécus a leur cotés.

A tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin en pensées et prière, Merci.



Meriem



Je dédie ce Mémoire …

Spécialement à mes chers parents qui m'ont élevé et soutenu tout au long de ma vie.

A mes chers et adorables frères.

A ma belle-sœur et sa famille.

A ma meilleur cousine Nassrine .

A mes amis : Yasmine , Insaf , Leila ,Zineb ,Kheira , Salma , ,Nassima , Zahira , Islam , Mohamed , Wissam , Siham et Nassrine .

A Ma Chère binôme ''MERIEM '' et sa famille

A tous mes camarades de la promotion 2015.

Hafidha

Résumé

Ce modeste travail une étude expérimentale portant sur la valorisation de fibres végétales résultant de palmier dattier dans le mortier auto-compactant (MAP). Dans cette étude, les fibres végétales (± 2 cm de longueur) sont ajoutées au MAP par fractions de volume par volume de mélange (0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% et 3%). L'état frais et le comportement de mortier durci sont analysés. Les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation de fibres végétales en tant que renfort dans le MAP est bénéfique. En raison de sa légèreté et ses propriétés acceptables, le MAP renforcé avec des fibres végétales semble être un matériau prometteur pour une construction plus durable.

Mots-Clés: Environnement, les déchets, le recyclage, mortier autoplaçant, fibres végétales

Abstract

This modest work is an experimental investigation dealing with the valorisation of vegetable fibers resulting from fruit dates in self-compacting mortar (SCM). In this study, different vegetable fibers (± 2 mm of length) volume fractions by volume of mixture (0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% and 3%) were considered. Fresh and hardened mortar behaviourare analysed.Experimental results show that the use of vegetable fibres as reinforcement in SCM is beneficial. Because of its lightness and its acceptable proprieties, SCM reinforced with vegetable fibres are a promising field towards a more sustainable construction.

Keywords: Environment, Waste, Recycling, Self-compacting mortar, Vegetable Fibers.

ملخص

هذا العمل المتواضع دراسة تجريبية لتثمين استعمال الألياف النباتية المستخلصة من النخيل في الملاط ذاتي الوضع . وفي هذه الدراسة ،قمنا بإضافة الألياف النباتية في الملاط الذاتي الوضع بطول (2 سم ±) مع نسب حجميه تتناسب مع حجم الخليط (0.5 % ، 1% ، 1.5 % ، 2 % ، 2.5 % و 3 %) . الخصائص الرطبة و الصلبة تم تحليلها ومعالجتها .

النتائج التجريبية أثبتت أن استعمال الألياف النباتية ساهمت في تخفيف الوزن و في تحسين الخصائص الميكانيكية للملاط الذاتي الوضع . ومنه فان الملاط الذاتي الوضع المقوى بالألياف النباتية يمكنه أن يصبح من مواد الأساسية في بناء المنشآت المستدامة .

كلمات المفتاح : المحيط ، بقايا ' رسكلة ، ملاط ذاتي الوضع ،الألياف النباتية

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Généralité sur le béton et leurs types

Tableau I.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP [48] 37

Tableau I.2 : Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais 44

Tableau I.3 : Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres 60

Tableau I.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques de fibres de verres 66

Tableau I.5 : Principales applications 69

Tableau I.6: Domaines d'utilisation du béton de fibres 81

Chapitre II : Matériaux et Essais

Tableau II.1 : Différents compositions utilisées dans la recherche 119

Tableau II.2: L'analyse chimique du ciment et composition du clinker 120

Tableau II.3 : Masse volumique apparent et absolu des granulats 129

Tableau II.4 : Résultats de l'absorption 129

Tableau II.5 : Module de finesse des granulats 130

Tableau II.6 : équivalent de sable des granulats 132

Tableau II.7: Masse volumique des fibres 134

Tableau II.8 : Taux d'absorption des fibres 135

Tableau II.9 : Résultats d'étalement sur MPAFV pour différentes % de SP 143

Tableau II.10: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier 146

Tableau II.11: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier 147

Tableau II.12: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier 148

Chapitre III : Résultats et Interprétations

Tableau III.1: Résultats de l'essai Vicat 165

Tableau III.2 : Résultats obtenus sur les MAPFV étudiés à l'état frais 166

Tableau III.3 : pourcentage de fibres végétales toléré pour la réalisation des différents types de MAP 171

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Généralité sur le béton et leurs types

Figure I.1 : Les mortiers pour chapes **11**
Figure I.2 : Les mortiers et coulis de réparation **11**
Figure I.3 : Contexte de développement du BAP au japon **17**
Figure I.4 : Compositions du béton autoplacant et du béton ordinaire **19**
Figure I.5 : Critère de blocage et géométrie du calcul **20**
Figure I.6 : Proportions du gravillon du sable d'un béton autoplaçant selon la méthode générale **29**
Figure I.7: Caractérisation du mortier **30**
Figure I.8 : Propriétés clés du béton autoplacant à l'état frais **34**
Figure I.9 : Schéma représente les essais permettant la détermination de la capacité de remplissage **35**
Figure I.10 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures **36**
Figure I.11 : Schéma représente les essais permettant la détermination de la capacité de passage **36**
Figure I.12 : Dispositifs expérimentaux **38**
Figure I.13: Essai d'étalement au cône (Slump flow) **39**
Figure I.14 : Essai à l'Entonnoir pour mortier **40**
Figure I.15 : ferraillage de la boîte en L (L-box test) **41**
Figure I.16 : Essai de la boîte en L (L-box test) **41**
Figure I.17 : Essai du tube en U (à gauche) et du caisson (à droite) **42**
Figure I.18 : L'essai de stabilité au tamis **43**
Figure I.19: Essai à la bille (à gauche) et à la colonne (à droite) **43**
Figure I.20: Essai de ressuage à l'aéromètre **44**
Figure I.21 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un béton de référence (REF) correspondant **47**
Figure I.22 : Résistance mécanique d'un béton vibré (BV) et de deux BAP **47**
(De formulation différente) **47**
Figure I.23: Phénomène du retrait **48**
Figure I.24 : Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté **50**
Figure I.25 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques **58**
Figure I.26 : Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables) **63**
Figure I.27: Exemples de fibres métalliques **63**
Figure I.28 : Fibres de carbones **65**

Figure I.29 : Fibres de verres **67**
Figure I.30: Fibres de polypropylène **68**
Figure I.31 : Classification schématique des différents types de composites **71**
Figure I.32 : béton de fibre **72**
Figure I.33: Encadrement d'un granulat **74**
Figure I.34 : Effets des fibres sur l'affaissement du béton au cône d'Abrams **75**
Figure I.35: Effet des fibres sur l'étalement des BAP **84**
Figure I.36 : Deux types de palplanche **86**
Figure I.37 : Exemple d'un voussoir **87**
Figure I.38 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions **88**
Figure I.39: Comportement à la traction de différentes compositions **89**

Les fibres végétales

Figure I.40: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine **90**
Figure I.41: Structure du bois **91**
Figure I.42 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin **92**
Figure I.43 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton **92**
Figure I.44 : Structure du bois (observations multi échelles) **93**
Figure I.45 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale **93**
Figure I.46 : Classement des fibres végétales **94**
Figure I.47 : Fibres végétales **95**
Figure I.48: Photo des palmiers dattiers **97**
Figures I.49: Quelques produits d'artisanat **97**
Figure I.50: Clôture en feuille de palme **98**
Figure I.51: Petite maison en feuilles de palme **98**
Figure I.52: Douche en feuilles de palme **98**
Figure I.53: Schéma d'une palme de palmier dattier **99**
Figure I.54 : Structure générale d'un palmier dattier **100**
Figure I.55 : Micrographie de fibre de palmier dattier par microscope à balayage **101**
Figure I.56 : Représentation schématique d'une fibre végétale **102**
Figure I.57: Représentation de la chaîne de cellulose **102**
Figure I.58 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculaires **103**
Figure I.59 : Liaison hydrogène inter et intramoléculaires au sein de la fibre de cellulose **103**
Figure I.60 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique **104**
Figure I.61: Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille **104**

Figure I.62 : Principaux glucides constituant les hémicelluloses **105**
Figure I.63 : Structure de la pectine **106**
Figure I.64 : Motifs élémentaires de la lignine **107**
Figure I.65 : Traitement des fibres par une solution de soude **112**
Figure I.66 : Modification par des alkyldiméthylchlorosilane **113**
Figure I.67 : Activation du greffage Polymère (NR)/cellulose par le permanganate **113**
Figure I.68 : Benzoylation des fibres cellulosiques **114**
Figure I.69 : Représentation schématique du comportement en flexion **114**

Chapitre II : Matériaux et essais

Figure II.1 : Le ciment utilisé (Annexe A) **120**
Figure II.2: sable roulé **121**
Figure II.3: sable concassé 121
Figure II.4 : MEDAFLOW 145 ..... **122**
Figure II.5: Les fibres de palmier dattier **122**
Figure II.6: Différentes types de fibres utilisées **123**
Figure II.7: La cire **123**
Figure II.8: La résine (sikadur) **124**
Figure II.9 : Protocol de l'essai d'analyse granulométrique **125**
Figure II.10: Analyse granulométrique des sables **126**
Figure II.11 : Protocol de l'essai de La masse volumique apparente **127**
Figure II.12: Protocol de l'essai de La masse volumique absolue **128**
Figure II.13: Protocole de l'essai équivalent de sable **132**
Figure II.14 : Protocole de l'essai de La masse volumique pour les fibres végétales **133**
Figure II.15: Protocole de l'essai taux d'absorption **135**
Figure II.16: Protocole de traitement (partie 1) **137**
Figure II.17: Protocole de traitement (partie 2) **137**
Figure II.18: Protocole de traitement (partie 3) **138**
Figure II.19: Le traitement **138**
Figure II.20: Les fibres avant / après le traitement **139**
Figure II.21: Protocole de traitement par la cire **140**
Figure II.22 : fibres brutes avec la résine **141**
Figure II.23 : fibre traités par NaOH avec la résine **141**
Figure. II.24: l'appareil de Vicat **142**
Figure.II.25: mélange de pâte de ciment **142**
Figure. II.26: mélange de pâte de ciment + les fibres végétales **142**

Figure II.27: Etalement pour SP=0.6% **144**
Figure II.28: Etalement pour SP=0.7% et 0.8% **144**
Figure II.29: Flottement des fibres et dégradation du mortier (Éprouvette conservée dans l'eau) **144**
Figure II.30 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant fibré **150**
Figure II.31 : Les moules **151**
Figure II.32 : Préparation des éprouvettes **151**
Figure II.33 : Conservation des éprouvettes **152**
Figure II.34 : Protocole de l'essai d'étalement **153**
Figure II.35 : Protocole de l'essai d'entonnoir (V-Funnel)…….....153
Figure II.36: Protocole de l'essai d'étalement **153**
Figure II.37 : Presse hydraulique (2000 kN) **157**
Figure II.38 : Protocole de l'essai de compression **157**
Figure II.39 : Le réctractomètre **159**
Figure II.40: Protocole de l'essai de retrait **160**
Figure II.41 : Protocole de l'essai de gonflement **160**
Figure II.42: Protocole de l'essai d'absorption d'eau **162**

Chapitre III : Résultats et Interprétation

Figure III.1 : L'étalement en fonction de facteur de fibre **167**
Figure III.2 : étalement homogène **168**
Figure III.3 : étalement non homogène (ségrégation) **168**
Figure III.4: étalement n'est pas circulaire **168**
Figure III.5: Temps (V-funnel) en fonction du pourcentage des fibres **169**
Figure III.6: Cas de blocage **169**
Figure III.7 : Teneur maximum en fibres **170**
Figure III.8: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP1 ..... **172**
Figure III.9: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP2 ..... **172**
Figure III.10: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP3 ..... **173**
Figure III.11: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP4 ..... **173**
Figure III.12: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP5 ..... **174**
Figure III.13: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP6 ..... **174**
Figure III.14: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP1 ..... **175**
Figure III.15: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP2 ..... **176**
Figure III.16: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP3 ..... **176**
Figure III.17: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP4 ..... **177**

Figure III.18: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP1.....**179**
Figure III.19: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP2.....**179**
Figure III.20: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP3.....**180**
Figure III.21: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP4.....**180**
Figure III.22: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP5.....**181**
Figure III.23: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP6.....**181**
Figure III.24: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP1.....**182**
Figure III.25: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP2.....**183**
Figure III.26: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP3.....**183**
Figure III.27: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP4.....**184**
Figure III.28: L'effet du traitement sur Rt (MPa).....**186**
Figure III.29: L'effet du traitement sur Rc (MPa).....**187**
Figure III. 30: Retrait en fonction de l'âge du MAP1.....**188**
Figure III.31: Retrait en fonction de l'âge du MAP2.....**188**
Figure III.32: Retrait en fonction de l'âge du MAP3.....**189**
Figure III.33: Retrait en fonction de l'âge du MAP4.....**189**
Figure III.34: Retrait en fonction de l'âge du MAP5.....**190**
Figure III.35: Retrait en fonction de l'âge du MAP6.....**190**
Figure III.36: les pores.....**191**
Figure III.37: Gonflement en fonction de l'âge du MAP1.....**192**
Figure III.38: Gonflement en fonction de l'âge du MAP2.....**192**
Figure III.39: Gonflement en fonction de l'âge du MAP3.....**193**
Figure III.40: Gonflement en fonction de l'âge du MAP4.....**193**
Figure III.41: Gonflement en fonction de l'âge du MAP5.....**194**
Figure III.42: Gonflement en fonction de l'âge du MAP6.....**194**
Figure III.43 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP1.....**195**
Figure III.44: Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP2.....**196**
Figure III.45 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP3.....**196**
Figure III.46 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP4.....**197**
Figure III.47 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP5.....**197**
Figure III.48 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP6.....**198**
Figure III.49 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP1.....**199**
Figure III.50 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP2.....**200**
Figure III.51 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP3.....**200**
Figure III.52 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP4.....**201**
Figure III.53 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP5.....**201**
Figure III.54: Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP6.....**202**

Figure III.55 : Evolution de la masse volumique en fonction des pourcentages **203**

BAP : bétons autoplaçants

MAP : mortiers autoplaçants

BAPF : bétons autoplaçants fibrés

MPAF : mortiers autoplaçants fibrés

BV: bétons vibrés

BRF : béton renforcé de fibres

BHP : bétons à hautes performances

BTHP : bétons à très hautes performances

BFV : bétons de fibres végétales

BPR : bétons de poudre réactive

MAP1: mortier autoplaçant de fibres brute

MAP2: mortier autoplaçant de fibres traité par cires

MAP3 : mortier autoplaçant de fibre traité NaOH

MPA4 : mortier autoplaçant de fibre traité NaOH+ cire

MAP5 :mortier autoplaçant de fibre traité par la résine

MAP6 : mortier autoplaçant de fibre traité par NaOH+ LA résine

FV : fibre végétale

FB : fibre brute

FC: fibre traité par la cire

FT: fibre traité par NaOH

FTC : fibre traité par NaOH + la cire

FR : fibre traité par la résine

FTR : fibre traité par NaOH+ la résine

PC : polycarboxylate

JSCE : Japanese Society of Civil Engineers

L_f : Longueur de la fibre

D_f : diamètre de la fibre

L_f/D_f : l'élancement

PAN : polyacrylonitrile

PET : polyéthylène téréphtalate

R_c : résistance à la compression

R_t : résistance à la traction

Remerciements
Résumé
Liste des tableaux
Liste des figures
Notations et abréviation

Introduction générale 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Généralité sur le béton et leurs types

I.1. Introduction 4

I.2. Généralités 4

I.2.1. Béton 4
I.2.1.1. La composition du béton 5
I.2.1.2. Les type du béton 5
A. Le béton à haute résistance 5
B. Le béton léger 6
C. Le béton lourd 6
D. Les bétons antibactériens 6
E. Le béton de fondation 7
F. Le béton projeté –gunité 7
I.2.1.3. Les défauts dérivés de la fabrication et de l'exécution du béton 8

I.2.2. Le mortier 9
I.2.2.1. Types de mortier 9
A. Mortier de ciment 9
B. Mortier de chaux 9
C. Mortier bâtard 9
D. Mortier de hourdage de maçonnerie 9
E. Mortier fabriqué sur chantier 9
F. Mortier industriel 10
I.2.2.2. Formulations des mortiers 10
I.2.2.3. Domaines d'utilisation des mortiers 11
A. Mortiers pour chape 11
B. Mortiers et coulis de réparation 11
C. Mortiers de scellements et calages 11
I.2.2.4. Cure et protection du mortier 12
I.2.2.5. Contrôle de qualité du mortier 13
A. L'ouvrabilité 13
B. Prise 14
I.2.2.6. Les Mortiers et l'Environnement 14

I.2.3. Conclusion 15

I.3. Béton autoplaçant 16

I.3.1. Qu'est ce qu'un béton Autoplaçant ? 16

I.3.2. Diverses appellations 18

I.3.3. Constituants du béton autoplaçant 18

I.3.3.1. Les granulats 19

I.3.3.2. Ciment 21

A. La fumé de silice 21

B. Cendres volantes 22

C. Laitier des hauts fourneaux 22

I.3.3.4. Les Superplastifiants 22

I.3.3.5. L'eau de gâchage 23

I.3.3.6. Les agents de viscosité 23

I.3.4. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant 24

I.3.4.1. Avantages 24

A. La mise en place 24

B. Les caractéristiques finales 25

C. La maintenance du matériel 25

I.3.4.2. Inconvénients 26

A. La fabrication 26

B. Le coût dépend du temps 26

I.3.5. Formulation des bétons autoplaçants 26

I.3.5.1. Formulation OKAMURA (La Méthode Générale) 28

I.3.5.2. Formulation CBI (Méthode Suédoise) 30

I.3.5.3. La formulation JSCE 31

I.3.5.4. Formulation LCPC (Méthode française) 32

I.3.6. Discussion et comparaison entre les différentes formulations 33

I.3.7. Caractérisation des BAP 34

I.3.7.1. Propriété de PAB à l'état frais 34

A. Le remplissage 35

B. La résistance à la ségrégation 35

C. La capacité de passage 36

I.3.7.2. Essais de caractérisation des BAP à l'état frais 37

A. Mobilité en milieu non confiné 38

B. Mobilité en milieu confiné 40

C. Stabilité 42

I.3.7.3. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci 46

A. Propriétés mécaniques 46

B. Propriétés physico-chimiques et durabilité 51

I.3.8. Fabrication, Transport et Mise en ouvre des BAP 52

I.3.8.1. Fabrication....52
I.3.8.2. Transport....52
I.3.8.3. Mise en œuvre des BAP sur chantier....53
I.3.9. Conclusion....*54*

I.4. Renfort fibreux....55
I.4.1. Généralités sur les fibres....*56*
I.4.2. Définition des fibres....*57*
I.4.3. Critère de choix du type de fibres....*58*
I.4.4. Avantages et Inconvénients des fibres....*59*
I.4.4.1. Avantage des fibres....59
I.4.4.2. Les inconvénients des fibres....59
I.4.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres....*60*
I.4.6. Le rôle des fibres....*60*
I.4.7. Différents types de fibres utilisées dans le béton....*61*
I.4.7.1. Les fibres métalliques....62
I.4.7.2. Fibres minérales....64
A. Les fibres de carbone....64
B. Les fibres de verre....65
I.4.7.3. Les fibres de polypropylène....67
I.4.8. Les principaux domaines d'application....*68*
I.4.9. Conclusion....*70*

I.5. Les bétons de fibres....71
I.5.1. Définition de béton de fibres....*72*
I.5.2. Avantages du béton fibré....*72*
I.5.3. Mise en œuvre du béton renforcé de fibres....*73*
II.5.3.1. Composition du béton de fibres....73
I.5.3.2. Formulation du béton de fibres....75
I.5.4. Propriétés physiques et mécaniques des bétons de fibres....*76*
I.5.4.1. Résistance à la compression....77
I.5.4.2. Résistance à la traction....77
I.5.4.3. Résistance à la traction par flexion....77
I.5.4.4. Résistance aux chocs....78
I.5.4.5. Résistance à la fatigue....78
I.5.4.6. Résistance à l'abrasion....78
I.5.4.7. Résistance au cisaillement....78
I.5.4.8. Comportement vis-à-vis du retrait....79
I.5.4.9. Perméabilité et résistance à la corrosion du béton de fibres....79

I.5.4.10. Résistance aux chocs thermiques 80

I.5.5. Domaines d'utilisation du béton renforcé de fibres 80

I.5.6. Conclusion 82

I.6. Bétons autoplaçants fibrés 83

I.6.1. Influence des fibres sur les propriétés a l'état frais 83

A. Effet sur l'étalement 84

B. Essai de V-Funnel 84

C. Essai J-RING 85

D. Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique) 85

I.6.2. Orientation et distribution des fibres 85

I.6.3. Utilisation des BAP fibres dans les structures 86

A. Palplanches 86

B. Voussoirs 86

I .6.4. Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés 87

A. Comportement à la flexion 87

B. Comportement à la compression et à la traction 88

Les fibres végétales

I.7. Les fibres végétales 90

I.7.1. Morphologie de la fibre végétale 91

I.7.2. Structure de la fibre végétale 92

I.7.3. Les différents types de fibres végétales 94

A. Les Fibres de Feuilles 94

B. Les Fibres de Tiges 94

C. Les Fibres de Bois 95

D. Les Fibres de Surface 95

I.8. Le palmier dattier 95

I.8.1. Généralités sur le palmier dattier 96

I.8.2. Utilisations générales et produits issus des palmiers-dattiers 97

I.8.3. Phénologie du palmier dattier 98

I.8.4. Fibre de palmier dattier 100

I.8.4.1 Structure des fibres 101

I.8.4.2. Composition chimique des fibres 101

I.8.4.2.1. Cellulose 102
I.8.4.2.2. Hémicelluloses 105
I.8.4.2.3. Pectines 105
I.8.4.2.4. Lignine 106
I.8.4.2.5. Extractibles 107
I.8.4.3. Matrice minérale et fibres végétales 107
I.8.4.3.1. Compatibilité des fibres végétales avec le ciment 108
I.8.4.3.2. Interface fibre-matrice : notion d'adhésion 108

I.9. Modification des fibres lignocellulosiques 109

I.9.1. Modification de l'interface fibre-matrice 109
I.9.1.1. Méthodes physiques de modification de la surface 110
A. Agents dispersifs 110
B. Traitements par décharges électriques (corona, plasmas froids) 110
C. Mercerisation 111
I.9.1.2. Méthodes chimiques de modification de la surface 111
A. Activation des fibres : prétraitement par les alcalins 111
B. Traitement des fibres par les silanes 112
C. Traitement par le permanganate 113
D. Traitement par benzoylation 113
I.9.2. Propriétés mécaniques 114
I.9.3. Influence sur la prise 116

I.10. Conclusion 117

chapitre II : matéraiux et essais

II .1. Introduction 119

II.2. Description des matériaux utilisés 120

II.2.1. Ciment 120
II.2.2. Granulats 121
A. Sable concassé (0/5) 121
B. Sable naturel roulé 121
II.2.3. Eau de gâchage 121
II.2.4. Superplastifiant 121
II.2.5. Fibres végétales 122
II.2.6. La cire 123
II.2.7. La résine 124

II.3. Caractérisation des matériaux 124

II.3.1. Les essais sur granulats 124
II.3.1.1. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2) 124
A. But de l'essai 124
B. Equipement nécessaire 124
C. Description de l'essai 125
D. Expression des résultants 126
II.3.1.2. Masse volumique des granulats 126
A. Masse volumique apparent (NF P18-555) 126
B. Masse volumique absolue (NF P18-555) 127
II.3.1.3. Coefficient d'absorption d'eau (NF P18-555) 129
II.3.1.4. Module de finesse de sable (NF P 18 -304) 130
II.3.1.5. Equivalent de sable (NF P18-598) 130
A. But l'essai 130
B. Conduite de l'essai 131
C. Expression des résultants 132

II.3.2. Les essai sur les fibres 133
II.3.2.1. Masse volumique 133
II.3.2.2. Taux d'absorption 134
II.3.2.3. Modification des fibres végétales 136
II.3.2.3.1. Traitement chimique des fibres 136
II.3.2.3.2. Traitement physique 139
II.3.2.4. Début et fin de prise (Aiguille de Vicat) (EN 196-3) 141
A. Principe de l'essai 141
B. Equipements utilisés 141
C. Conduite de l'essai 142

II.4. Formulation de mortier 143

II.4.1. Optimisation du pourcentage de superplastifiant 143

II.4.2. Les mortiers formulés 145

II.5. Séquence de malaxage 149

II.5.1. Préparation et Conservation des Eprouvettes 151

II.6. Les essais sur les mortiers 152

II.6.1. Etat frais 152
II.6.1.1. Essais d'étalement au mini-cône 152
A. Matériel nécessaire 152
B. Mode opératoire 152
II.6.1.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel) 153
A. Matériel nécessaire 154
B. Mode opératoire 154

II.6.2. Etat durci 155
II.6.2.1. Essai de traction par flexion 155
II.6.2.2. Essai de compression 156
Figure II.38 : Protocole de l'essai de compression 157
II.6.2.3. Retrait et gonflement 158
A. Objectif de l'essai 158
B. Equipement utilisé 158
C. Principe de l'essai 159
II.6.2.4. Absorption d'eau par capillarité 161
A. Objectif de l'essai 161
B. Equipement nécessaire 161
C. Principe de l'essai 161
II.6.3. Récapitulation des essais faits à l'état frais 162
II.6.4. Récapitulation des essais faits à l'état durci 163
II.7. Conclusion 164

Chapitre III : résultats et interprétations

III.1. Introduction 165
III. 2. Mortier frais 165
III. 2.1. Temps de prise 165
III. 2.2. Effet des fibres végétales sur l'étalement 167
III. 3.3. Le temps d'écoulement à travers le V-funnel 168
III. 2.4. Teneur maximale en fibres végétales 170
III.3. Essais sur un mortier durci 171
III.3.1. Résistance à la compression 171
a. Conservation à l'air libre (mode ambiant) 171
b. Conservation dans l'eau (mode saturé) 175
III.3.2. Résistance à la traction par flexion 178
a. Conservation à l'air libre (mode ambiant) 178
b. Conservation dans l'eau (mode saturé) 182
III.4. L'effet de traitement des fibres végétales sur les caractéristiques mécaniques des mortiers autoplaçants fibré 185
III.5. Retrait et gonflement 187
A. Mode ambiant (Retrait) 188

B. Mode saturé (gonflement)....192
C. Perte en poids des différents mélanges....195

III.6. L'absorption d'eau....199

III.7. Densité (masse volumique)....203

III.8. Conclusion....204

Conclusion générale et recommendation....206

Références bibliographiques

Annex.

Introduction

Générale



Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde .En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires,….

Après la recherche d'une amélioration de la résistance et de la durabilité, une étape supplémentaire est franchie avec les bétons autoplaçant (BAP).Les bétons autoplaçant possèdent une plage d'utilisation très large : des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, mais également des utilisations diverses (de l'habitation aux ouvrages d'art).

Les bétons autoplaçant sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Les bétons autoplaçant ont été mis au point dans les années 90 au Japon. Depuis, leur utilisation ne cesse de s'étendre en Europe et sur le continent nord américain en raison de l'intérêt économique et des possibilités techniques qu'ils représentent :

- Diminution du temps de réalisation lors de la mise en place du béton sur chantier,
- Diminution de la pénibilité du travail sur chantier,
- Possibilités techniques nouvelles : coulages de zones fortement ferraillées, dans des coffrages à géométrie complexe ou très encombrée, réparation de zones difficilement accessibles.

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité .Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines et /ou l'emploi d'agents de viscosité. Parallèlement à cela, les BA présentent les particularités de compositions suivantes comparativement aux bétons vibrés : volume de pate élevé, dosage élevé en fines, rapport G/S proche de 1 et un diamètre maximal de granulats D_{max} réduit.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années.

Les conditions d'environnement chauds et secs, tel que la région saharienne de notre pays, dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit à des retraits importants et des fissures dans les structures. Le renforcement des bétons par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques.

L'une des avancés en matière de béton est celle de l'incorporation de fibres qui n'est que la simple transposition des renforcements utilisés depuis très longtemps dans des matériaux comme la terre, l'argile ou le plâtre. Il s'agit du béton de fibre composé d'une matrice cimentaire et des fibres métalliques. L'utilisation de ce type de béton comme un matériau de construction remonte début des années soixante.

Il a ainsi ouvert la voix de la recherche sur les bétons autoplaçant de fibres(BAPF) ; notamment le fonctionnement des fibres et leurs interactions avec la matrice.

Toutefois, l'étude de tels matériaux doit de plus en plus, à cause des normes en vigueur, prendre en compte le volet environnemental dans leur développement.

Les composites fibres végétales / matrice cimentaire ont été beaucoup étudiés depuis ces derniers années car les fibres végétales possèdent beaucoup d'avantage comparés aux fibres d'amiante: le faible coût, des propriétés d'élaboration plus sains pour la production des composites de différentes formes, le renouvellement et le recyclage, alors que l'utilisation d'amiante a été mise en cause par la législation sur la santé.

Le renforcement des ciments par des fibres cellulosiques donne un matériau composite qui peut remplacer l'amiante-ciment dans de nombreuses applications telles que les plaques de toiture, la tuyauterie, les revêtements des murs et d'autres applications.

Le choix du renfort reste cependant très important. Il doit avoir de bonnes propriétés intrinsèques de résistance (module d'élasticité, géométrie etc.), doit être compatible avec la matrice cimentaire avec laquelle il va être associe et doit aussi avoir un coût acceptable.

En Algérie l'Alfa, le palmier dattier, le crin végétal et le liège se trouvent abondants leurs récoltes et leurs industrialisations sont une source de revenus considérable pour des populations entières.

La fibre de palmier dattier est retenue pour des raisons de disponibilité et d'économie, proviennent d'une source renouvelable et qui peuvent être intégrées d'une façon rationnelle dans le domaine de la construction.

L'objectif de ce mémoire est l'élaboration et la caractérisation du mortier autoplaçant renforcé par les fibres végétales (palmier dattier). Plus précisément notre démarche repose sur la connaissance du comportement des fibres de palmier dattier naturelles et traitées (Traitement alcalin par la soude et traitement physique par la cire et la résine) afin de déterminer les modifications quels engendre sur l'hydratation du ciment, l'adhérence ainsi que le comportement mécanique de tel composite.

Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique, en présentant les notions fondamentales des bétons ordinaires, bétons autoplaçants, et le renforcement par des fibres, à savoir les propriétés des principaux types de fibres utilisées dans les domaines de la construction et aussi un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci. Et traite aussi le comportement des fibres végétales en particulier les fibres palmier dattier ainsi que l'étude détaillé de l'architecture chimique, morphologique et structurale des fibres végétales.et sera consacrée aussi à la modification chimique des fibres lignocellulosiques.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'ensemble des essais effectués au laboratoire, leur principe et leur mode opératoire. Caractérisant l'ouvrabilité des MAP à l'état frais, et les essais mécaniques (compression et traction) des BAP à l'état durci. Nous avons réalisé aussi une étude pour l'amélioration de la durabilité du mortier autoplaçant de fibres végétales du palmier dattier par traitement de la surface (physiques et chimiques) avec différents pourcentages.
Dans le troisième chapitre, analyse et discute les résultats des différents essais réalisés.

Nous présentons des conclusions générales sur les mortiers de fibres végétales de palmier dattier et leurs caractéristiques. En se basant sur les résultats obtenus, nous donnons quelques recommandations.

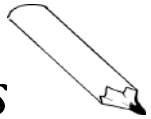
Enfin, nous espérons que ce travail apportera une contribution au développement et à la valorisation des fibres végétales de palmier dattier.

chapitre I

Synthèse bibliographique



Généralité sur béton et leurs types



Le premier sous chapitre est consacré à l'étude bibliographique, dans lequel il est rappelé les principaux travaux en relation avec notre travail. Ce chapitre, servira par la suite par généralités sur les fibres végétales.

I.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction qui trouve pratiquement son champ d'utilisation dans tous les domaines du génie civil. De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en de performances mécaniques, de durabilité ,d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect .Dans ce but , les recherches continuelles ont permis l'émergence de bétons spéciaux : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BHTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçant (BAP).Nous allons, dans ce premier chapitre, aborder les différents aspects des bétons notamment des généralités qui concernent leurs émergences, les avantages et les inconvénients de leur utilisation ainsi que les différentes approches de formulations et méthodes de caractérisation.

I.2. Généralités

I.2.1. Béton

Lors des dernières années, le béton est devenu de nouveau un matériau versatile après avoir gagné une réputation importante pour la création de blocs uniformes de couleur gris.

En réalité, le béton ne doit pas obligatoirement être gris, ni servir uniquement pour créer des blocs rectangulaires.

Il s'agit d'un matériau très industrialisé qui a beaucoup évolué. La fibre renforcée a produit des bétons de grande durabilité. Il existe différents bétons ductiles et d'élasticité variée. Les caractéristiques primordiales comme la résistance ou l'opacité ne sont plus imposées.

Aujourd'hui des bétons translucides avec des agrégés transparents de fibre optique sont déjà disponibles dans le marché.

Différents formes de traitement du béton sont développées, il est possible d'imprimer des designs faits sur mesure sur la surface, ainsi que des photographies de qualité relative . ces finitions sont produites par différents méthodes qui utilisent des additifs ou des structures spéciales de béton élastique.

Le développement de ce matériau prend aussi en compte les notions du respect de l'environnement.

L'élément le plus commun est l'usage de matériaux recyclés comme des agrégés. par contre avec l'addition du dioxyde de titane, le béton peut avoir un effet positif sur l'environnement

puisqu'il réduit la pollution atmosphérique. Les agglomérats qui utilisent des joints avec des basses de polymères au lieu de ciment, sont des matériaux similaires au béton commun. Il est généralement utilisé pour des sols, les matériaux présentent une grande variété de couleurs et de textures face à la possibilité d'utiliser presque tout type de matériau comme agrégat **[1].**

I.2.1.1. La composition du béton

Le béton est le résultat d'un mélange de ciment et d'un autre élément composé par des granulats et des adjuvants (sable et graviers) qui, mélangés avec l'eau, forment une masse que l'on peut mouler et compacter avec facilité. Cette caractéristique plastique disparait petit à petit au bout de quelques heurs, la masse prend et acquiert l'aspect, le comportement et les propriétés d'un corps solide de consistance compacte, similaires à ceux d'une roche. Le résultat final, le béton en durci, est ainsi un matériau mécaniquement résistant. La proportion la plus habituelle des différents composants utilisés pour la préparation du béton est trois parties de sable et quatre adjuvants **[1].**

I.2.1.2. Les type du béton

A. Le béton à haute résistance

Se sont les bétons indiqués pour des milieux agressifs et pour des structures qui exigent des prestations et des indices d résistance très élevées **[1].**

A.1. Son utilisation

- Structures en béton armé intégrées dans des éléments de composition comme des poteaux et des murs porteurs
- Structures en béton armé intégrées dans des éléments en flexion simple : poutres, planchers, mur d'enceintes
- Structures en béton armé intégrées dans des éléments massifs : fondation, blocs, etc
- Dalles pour ponts **[1].**

A.2. Ses avantages

- Meilleures relation cout/ prestations pour les colonnes et les poteaux ;
- Economie des structures, particulièrement pour les poteaux : des sections plus petites, réduction de l'acier, plus d'espace libre ;
- Une plus grande durabilité grâce à sa basse perméabilité, idéal pour des milieux agressifs.

B. Le béton léger

Se sont des bétons à bases densités avec d'excellentes propriétés d'isolement thermique et acoustique **[1].**

B.1. Son utilisation

- Porte-à-faux et toits terrasses ;
- Remplissage de tranchées, toitures non praticables et réhabilitation.

B.2. Ses avantages

- Bon comportements ignifuge ;
- Isolant thermique et acoustique ;
- Grandes diminutions des coefficients de dilatation thermique ;
- Economie sur les structures, les fondations et les pilotis grâce à la réduction du poids.

C. Le béton lourd

Il s'agit de bétons idéaux pour la protection contre les radiations grâce à leur grande densité par rapport au béton conventionnel (>2800 kg/m³) **[1].**

C.1. Son utilisation

- Barrière protectrice contre les radiations provenant de l'énergie nucléaire
- Fondations d'éléments d'excessive sveltesse, évitant la courbure.

C.2. Ses avantages

- une plus grande protection face aux rayons X et gamma ;
- grand niveau d'absorption des neutrons rapides et des radiations ;
- barrière de protection durable et avec peu d'entretien.

D. Les bétons antibactériens

Se sont des bétons caractérisés par leur capacité d'inhiber le développement et la croissance de bactéries et de champignons, tant à l'extérieur comme à l'intérieur **[1].**

D.1. Son utilisation

- Silos de stockage de graines ;
- Usines agroalimentaires ;
- Complexes d'élevage de bestiaux ;
- Centres de recyclage de déchets ;

- Hôpitaux et centres de santé ;
- Piscines ;
- Infrastructures d'approvisionnement d'eau potable.

D.2. Son avantages

- L'agent biocide du dosage utilisé pour ces bétons ne présente pas de toxicité pour les personnes, les animaux et les plantes ;
- Ses propriétés antibactériennes / fongicides ne modifient pas les caractéristiques du béton ;
- Il n'exige aucun traitement ni recouvrements supplémentaires (peintures, résines, etc.…).

E. Le béton de fondation

Se sont des bétons spécialement indiqués pour les fondations qui exigent une grande assise et une ségrégation nulle ou basse **[1].**

E.1. Son utilisation

- Semelles, poutres, pieux et tranchées ;
- Pilotis, murs écran et dalles.

E.2. Ses avantages

- Temps d'exécution réduit ;
- Ils présentent un délavage et une désagrégation nuls lorsqu'ils sont submergés dans l'eau ;
- Elimination des défauts sur les pilotis ;
- Perméabilité basse ;
- Elimination de l'exsudation sur l'extrémité du pilotis.

F. Le béton projeté –gunité

Se sont les bétons qui permettent leur application sur des surfaces irrégulière où l'on n'utilise ni des coffrages ni des éléments de support pour le béton frais **[1].**

F.1. Son utilisation

- Revêtements de tunnels ;
- Stabilisation des talus et des tunnels ;
- Creux pour dépôts, piscines et canaux ;

- Réhabilitation de structures en générale ;
- Protection réfractée de l'acier contre le feu.

F.2. Ses avantages

- Il permet la réparation et la réhabilitation de structures en béton détérioré par recouvrement sans démolir totalement ou partiellement la structure ;
- Dans le cas de voie sèche, il réduit l'indice de rebond.

I.2.1.3. Les défauts dérivés de la fabrication et de l'exécution du béton

L'exécution peut sérieusement influencer la qualité d'un béton, surtout au niveau de ce qui concerne la durabilité et la sécurité.

Les dégâts qui peuvent avoir lieu sont la diminution de la résistance et le mauvais aspect du béton : plus il est mauvais, plus l'état du matériau est grave.

La solution est la prévention de cette circonstance à travers une correcte connaissance des principes de dosage et de fabrication des directeurs de chantier et une adéquate qualification des ouvriers **[1].**

Les facteurs qui influencent la variation des caractéristiques du béton et qui peuvent être dérivés de l'exécution sont :

- **Un dosage mal réalisé**, par déficience des appareils et des équipes de mesure il faut surtout contrôler le dosage du ciment et la proportion eau / ciment
- **Le transport et la coulée**, qui produisent des ségrégations, ils n'assurent pas l'homogénéité de la masse et par conséquence ils produisent des zones peu compactes, avec des creux ou des nids de graviers.
- **Une compacité déficiente**, qui induit une mauvaise compacité du béton.
- **La forme du coffrage** , la correcte installation du coffrage évite des fuites de la masse qui peuvent produire la perte d'une partie du ciment et des zones peu compactes ou provoquer de bas contenus de ciments sur les zones de recouvrement , réduisant la protection des armatures .les deux caractéristiques fondamentales du béton qui sont affectées par des défauts causés par une mauvaise exécution sont **la compacité** et **l'homogénéité [1].**

I.2.2. Le mortier

On appelle mortiers 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

$D \leq 4mm$, béton pour $D \geq 4mm$ **[2]**.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier est 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 **[3]**.

I.2.2.1. Types de mortier

Dans les travaux publics on utilise différents types de mortier:

A. Mortier de ciment

Les mortiers de ciments sont très résistants, durcissent rapidement. Le dosage du rapport entre le ciment et le sable est en général volumétrique de 1/3 et le rapport de l'eau sur ciment est environ 0,35. De plus, un dosage en ciment les rend pratiquement imperméables **[3]**.

B. Mortier de chaux

Les mortiers de chaux sont moins résistants par rapport aux mortiers de ciment. La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments **[3]**.

C. Mortier bâtard

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée **[3]**.

D. Mortier de hourdage de maçonnerie

On utilise des sables dont les grains les plus gros n'excèdent pas 5 mm, le dosage le plus usuel est de 1 volume de liant pour trois volumes de sable. La quantité d'eau qui joue un rôle important ne peut être fixée à priori, en règle générale on adopte une valeur voisine de la moitié du poids du liant qui peut être réduite lorsqu'on utilise un plastifiant **[3]**.

E. Mortier fabriqué sur chantier

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu.

On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie.

Le sable est généralement dosé en poids, soit en volume. Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables **[3]**.

F. Mortier industriel

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins **[3]**.

I.2.2.2. Formulations des mortiers

Les mortiers composés de chaux et de ciment portland sont définis en deux étapes **[4]**. Le mortier doit d'abord être défini en fonction de la résistance requise pour l'application. Ensuite, il faut décider si on spécifie les proportions ou les propriétés énumérées dans la norme Américaine **[5]**.

La norme ASTM C270 **[5]** (Mortar for Unit Masonry) fournit une base pour la définition des mortiers de ciment et de chaux. Cette norme fournit une base pour cinq types de mortier différents en fonction de la résistance du mortier requise pour l'application. Les noms de ces mortiers, élaborés en 1954, étaient basés sur les lettres alternantes de la phrase « **M**A**S**O**N** W**O**R**K** ». Le mortier de type M offre la plus grande résistance. Le mortier de type K a la plus faible résistance à la compression. **[5]**

La norme ASTM C270 **[5]** fournit une spécification de proportion et de propriété pour chaque type de mortier.

I.2.2.3. Domaines d'utilisation des mortiers

A. Mortiers pour chape

Ce type de mortier **[6]** illustré dans la (**Figure I.1),** utilisé généralement pour:

- mise à niveau de la dalle et régularité de la surface ;
- Support de revêtement, ou isolation incorporée.



Figure I.1 : Les mortiers pour chapes **[6]**

B. Mortiers et coulis de réparation

Comme son nom l'indique, ce type de mortier est utilisé pour le reprofilage du béton, la reconstitution de la protection des armatures, et le rétablissement de l'étanchéité **[7]**.

La (**figure I.2**) illustre en gros une partie du cas pratique.

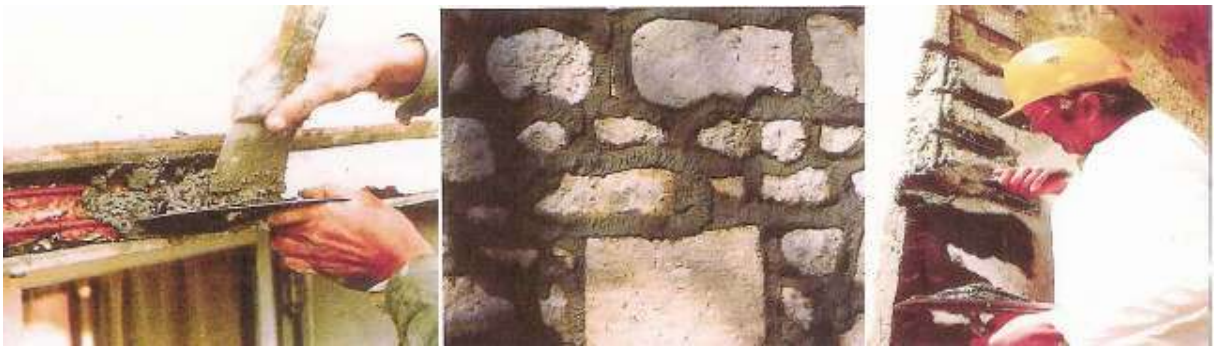


Figure I.2 : Les mortiers et coulis de réparation **[6]**

C. Mortiers de scellements et calages

- Absence de retrait ;
- Caractère expansif du mortier ;
- Résistance au jeune âge.

I.2.2.4. Cure et protection du mortier

Éviter que le mortier ne sèche trop vite, car cela peut entraîner des fissures de retrait. Les joints de mortier frais doivent être protégés de la pluie, du vent et du soleil et être maintenus humides pendant trois à sept jours **[8]**.

Les mortiers à base de liants hydrauliques à durcissement lent, comme la chaux hydraulique, devraient être soumis à une cure humide d'au moins sept jours, et les mortiers de ciment Portland et de chaux de type N et O, à une cure humide de trois à quatre jours **[8]**. Pour créer les conditions de la cure humide,

Installer une toile de jute humide (recouverte d'une membrane de plastique) sur la maçonnerie et ré-humecter régulièrement la toile de jute avant qu'elle ne sèche **[8]**. (Tenir la toile de jute hors de contact de la maçonnerie pour éviter les taches de mortier).

L'humectation régulière seule de la maçonnerie ne suffit pas, car l'évaporation de l'eau à la surface de la maçonnerie peut se produire très rapidement par temps chaud, sec et venteux. Éviter que l'eau ne s'écoule des joints de mortier pendant la cure humide, sous peine de lessiver la chaux contenue dans le mortier et de causer des taches. Veiller à rejointoyer bien avant ou bien après les périodes de gel.

Si le rejointoiement s'est involontairement poursuivi dans la saison froide, protégé du gel le mortier fraîchement placé. Pour les mortiers plus résistants, planifier la cure suivante **[8]**

- Pour les trois premiers jours, la cure humide devrait se dérouler à une température toujours supérieure à 10 °C. (Installer une toile de jute humide recouverte d'une membrane de plastique.). Cette période doit être prolongée pour atteindre jusqu'à 7 jours lorsqu'il s'agit de mortiers moins résistants. ·
- Pour les quatre jours suivants, la maçonnerie devrait être protégée du vent et de la pluie et maintenue à une température supérieure à 0 °C. À cette étape, il convient de retirer la toile de jute et la membrane de plastique). Cela permettra au mortier de sécher partiellement avant son exposition au gel. Toutefois, éviter un séchage trop rapide du mortier (le chauffage de l'air réduit son humidité relative). On s'assurera donc de maintenir une humidité relative élevée à l'intérieur de l'abri chauffé. Dans le cas des mortiers de très faible résistance, une période plus longue de protection contre les intempéries peut s'imposer.

I.2.2.5. Contrôle de qualité du mortier

Le spécialiste en conservation chargé de la supervision des travaux et du contrôle de la qualité doit se rendre sur le chantier plus souvent qu'il ne le fait pour les projets de construction de maçonnerie moderne **[9]**.

La performance des mortiers de faible résistance est tributaire de la qualité de leur mise en œuvre. Une inspection quand les joints sont dégarnis, nettoyés et découpés en angle droit, après un rejointoiement en profondeur (>25 mm) et quand le rejointoiement est complété, contribue à la qualité des travaux **[9]**. Les essais de contrôle de la qualité comprennent la résistance à la compression des cubes de mortier, le foisonnement du sable (soit le changement de volume imputable à la teneur en humidité du sable), la teneur en air du mortier frais, le rapport liant/sable et la consistance du mortier **[9]**.

Le cône de Vicat est un outil qui permet aux responsables du contrôle de la qualité de vérifier rapidement au chantier la consistance du mortier et de surveiller sa perte d'eau par temps chaud.

La qualité du mortier est contrôlée par :

A. L'ouvrabilité

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils :

A.1. La table à secousses

Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule **[9]**

$$\mathbf{E\ (\%) = 100\ \frac{Dr-Di}{Di}} \qquad \textbf{(Equation I.1)}$$

Dr = diamètre final

Di = diamètre initial.

A.2. Le maniabilimètre du LCPC

Le principe de l'essai consiste à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

A.3. Le cône

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône qui peut être muni d'un vibrateur **[10]**.

B. Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur **[10]**.

C. Résistances mécaniques

Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (Entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs **[11]**

- nature et dosage en ciment ;
- rapport C/E ;
- granulométrie et nature du sable ;
- énergie de malaxage et mise en œuvre ;
- protection les tous premiers jours.

D. Retraits et gonflements

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).Le gonflement des mortiers sont en général assez faibles **[12]**.

I.2.2.6. Les Mortiers et l'Environnement

Les mortiers performanciels permettent de construire durablement dans le respect de l'environnement. Dans le grand concert du Développement Durable, les adhérents ont tenu à

rappeler cette affirmation toute simple. La plupart du temps les mortiers ne se voient pas ou passent inaperçus, pourtant il est important de rappeler quelques évidences :

- Les mortiers sont des produits indispensables techniquement car ils sont le lien durable et compatible entre tous les matériaux et tous les produits.
- Les mortiers sont des produits respectueux de leur environnement, issus de matières premières naturelles et durables, économiques en CO2 et en eau, respectueux des individus et recyclables en fin de vie car inertes.
- Les mortiers contribuent à l'élaboration des constructions durables, sur le plan énergétique, thermique qui permettant les calculs de l'ouvrage pour lequel ils sont utilisés. Enfin, les mortiers lorsqu'ils sont visibles, sont esthétiques et décoratifs et permettent un large choix architectural en neuf comme en rénovation, en extérieur comme en intérieur **[13]**.
- Dans le souhait de rappeler tous ces éléments, en Europe une grande opération de communication entre les économistes, promoteurs, bureaux d'étude, architectes vient d'être engagée par les industriels. Une enveloppe leur est adressée contient une brochure explicative sur le respect de l'environnement dans la construction grâce aux mortiers, et rappelle comme une évidence toutes les utilisations possibles avec les mortiers, et avec son calendrier en façade, elle a pour objectif de rester « durable» **[14]**.

I.2.3. Conclusion

Les mortiers frais, comme le béton frais, se comportent comme corps de Bingham, et les chercheurs ont montré que les effets de différents adjuvants et Additions sur les performances des mortiers sont semblables à ceux observés avec le béton et des essais faits sur des mortiers peuvent être employés pour choisir le système ciment-adjuvant-Addition, compatible et pour prévoir le comportement du béton dans différentes conditions technologiques.

L'étude du comportement du béton et du mortier est plus complexe que celui de la pâte. Sa théorie est encore peu explorée et nécessite plus d'investigation et de recherches théoriques et expérimentales **[15]**.

I.3. Béton autoplaçant

Les différentes structures actuelles du génie civil présentent de plus en plus des formes complexes, avec une concentration assez importante d'armatures (section très ferraillées). Celles-ci entrainent d'énormes difficultés de réalisation sur chantier surtout l'accès pour la mise en place et consolidation du béton dans le coffrage **[16].**

Afin d'adapter le béton à ce type d'ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (faibles ségrégation, ressuage et tassement), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité. L'expertise acquise lors des travaux de recherche sur les BHP et la maîtrise croissante des nouveaux superplastifiants ont permis la mise au point de nouveaux bétons: les **BÉTONS AUTOPLACANTS (BAP)** qui répondent largement à ces exigences **[17].**

Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau facile à mettre en œuvre, sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur le chantier, tant au niveau de la sécurité que de la diminution des nuisances sonores et des conditions de travail sur chantier.

I.3.1. Qu'est ce qu'un béton Autoplaçant ?

Au japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieur pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autoplaçants (« Self-compacting concrete », traduit par béton autoplaçant ou béton autonivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier **[18]**. La (**figure I.3**) illustre le contexte de développement du BAP au japon.

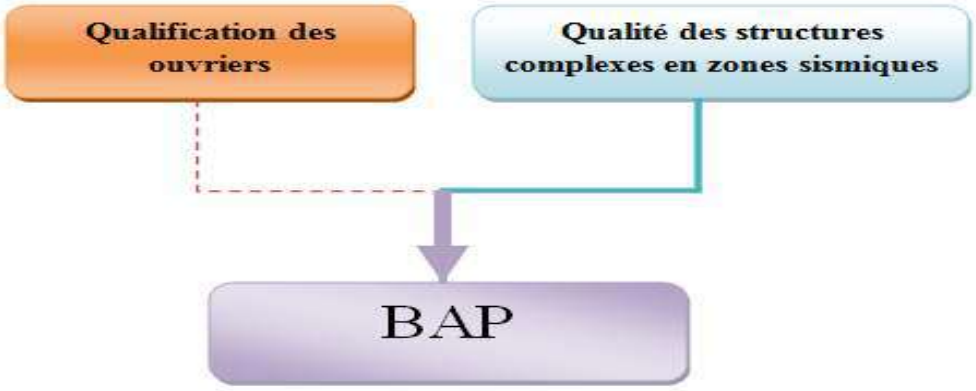


Figure I.3 : Contexte de développement du BAP au japon **[18]**

L'idée d'un béton fluide ou béton autoplaçant (BAP) est apparue en 1989, alors que les Japonais avaient besoin d'un béton qui n'exige pas une main d'œuvre nombreuse et qualifiée, et qui fournisse une résistance à la compression élevée à jeune âge pour pouvoir augmenter la productivité. Ainsi, le progrès et l'évolution en génie civil dans différentes applications telles que les ponts suspendus, les grattes ciel et surtout la grande orientation de l'usage des bâtiments vers une utilisation spécifique et une qualité architecturale accrue, ont été les enjeux concrets du développement des bétons fluides **[19], [20]**.

L'intérêt des autres pays pour ce type de béton n'est apparu qu'après quelques années, mais il est en plein essor. En France le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) se penche sur la question au début des années 90. Les premières applications en grandeur réelle sont réalisées au début de 1988, à Brest, sur le chantier d'extension du parc de loisirs Océan polis pour des voiles courbes de grande hauteur fortement ferraillés. Aussi lors de la construction d'un collège dont les façades sont inclinées, à géométrie complexe, et des formes non répétitives excluant toute possibilité de préfabrication **[21]**.

Le béton autoplaçant ,BAP, est un matériau innovant et relativement jeune qui se caractérise à l'état frais par sa fluidité élevée , sa stabilité rhéologique et par son excellente adéquation au bétonnage des éléments complexes .Ce nouveau matériau ,dont la mise en place s'effectue sous l'action de son poids propre et sans aucun apport d'énergie, devrait remplacer le béton traditionnel vibré ,compte tenu de la réduction du coût de la main d'œuvre et de la durée de construction des ouvrages ,ainsi que de l'élimination de nuisances sonores en milieu urbain.

Sa mise en place nécessite une fluidité et une viscosité élevée, aucun signe de ségrégation, et le maintien d'une homogénéité parfaite. Le matériau frais doit donc s'écouler avec un débit important sans risque de blocage au droit des obstacles et sans risque de séparation des constituants. De plus le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton afin d'assurer l'homogénéité de ses propriétés mécaniques **[22].**

I.3.2. Diverses appellations

L'habitude a été prise de décliner les BAP en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant", ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc...) La seconde désigne sous l'appellation "béton autonivellant", ou BAN, les bétons destinés aux applications horizontales (dalles). Dans cette catégorie, il faut ajouter les mortiers autonivellants, qui connaissent un succès important pour les chapes **[23].**

Chaque famille de BAP est formulée suivant un même principe, mais possède néanmoins certaines particularités. La formulation des BAN comporte a priori moins de contraintes que celle des BAP. Dans leur cas, seul l'essai d'étalement est couramment effectué. L'essai à la boîte en L n'a pas de réelle utilité, puisque les dalles sont des milieux peu confinés. Il est à noter que les BAN doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'auto-nivellement. La mesure du temps pour obtenir l'étalement final, ou encore un étalement de 50 cm (souvent noté t50), est à ce titre une donnée utile pour évaluer la viscosité. Il est regrettable en revanche que la stabilité des BAN ne soit que rarement contrôlée avec l'essai au tamis **[23].**

I.3.3. Constituants du béton autoplaçant

Les BAP sont des bétons à quatre composants : les granulats, le liant, l'eau et les ajouts. Les granulats et le ciment utilisés pour un BAP sont les mêmes que ceux utilisés pour la fabrication d'un béton ordinaire. Ce qui particularise la composition des BAP, c'est la proportion des différents constituants et non pas leurs propriétés. En plus des granulats, la formulation d'un BAP se distingue par la présence d'un ajout chimique et /ou minéral **[24], [13]**.

Les constituants de base d'un béton ordinaire sont le ciment, l'eau et les granulats. Les différents constituants proposés pour composer les bétons autoplaçants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, sont : Les granulats, les

fines, le superplastifiant et parfois l'agent de viscosité. La (**Figure I.4**) montre les composantes des deux types de béton, le béton ordinaire et le BAP

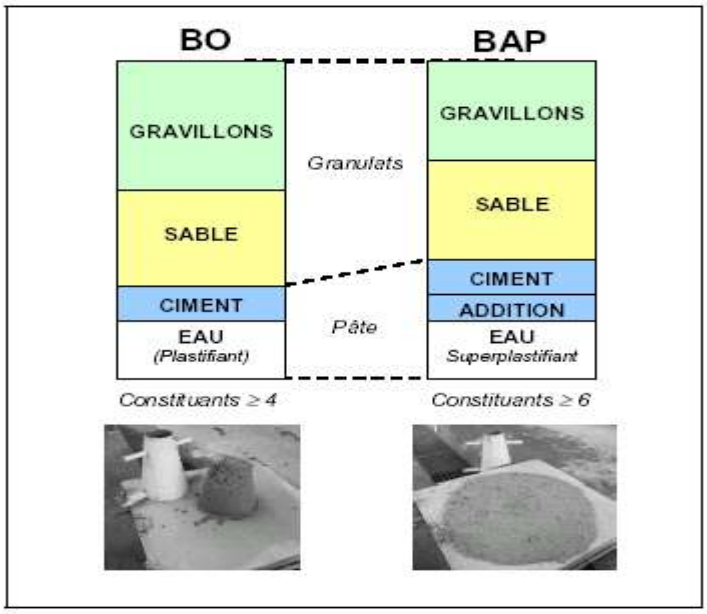


Figure I.4 : Compositions du béton autoplacant et du béton ordinaire

I.3.3.1. Les granulats

Les BAP sont réalisés avec des granulats roulés ou concassés, toutefois, comme pour un béton ordinaire, la forme des granulats a une influence sur le comportement rhéologique. Le coefficient de frottement est plus faible entre les granulats roulés qu'entre les granulats concassés.

Les granulats roulés présentent par ailleurs un plus petit vide inter granulaire, ce qui nécessite une plus petite quantité de pâte de ciment pour le remplir.

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 **[23]**.

D'autre part le sable est un facteur important pour la fabrication du BAP vu qu'il a une influence déterminante sur ses propriétés à l'état frais. Si la proportion de sable augmente par rapport au gravier, la demande en eau et le rapport E/C augmentent, tandis que la viscosité

diminue. Et inversement en cas de diminution de la proportion de sable. Le sable présente une demande en eau réduite lorsque sa teneur en fines est faible **[25].**

Par ailleurs la flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est meilleure, raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 15 mm. Dans la thèse **[26]** explicite que la taille maximale D max des granulats, étant un facteur non négligeable, peut provoquer un blocage. Il apparaît que le risque de blocage, pour un ferraillage donné, augmente lorsque le diamètre maximum des granulats augmente. Jin **[27]** reporte que Fujiwara et al, ont calculé, dans le cas d'un ferraillage unidirectionnel (ferraillage vertical uniquement) et dans le cas d'un ferraillage bidirectionnel (ferraillage verticale et horizontal), un espacement minimum au-delà duquel le risque de blocage diminue. Ils obtiennent les critères présentés sur la (**Figure I.5**) **[27]**

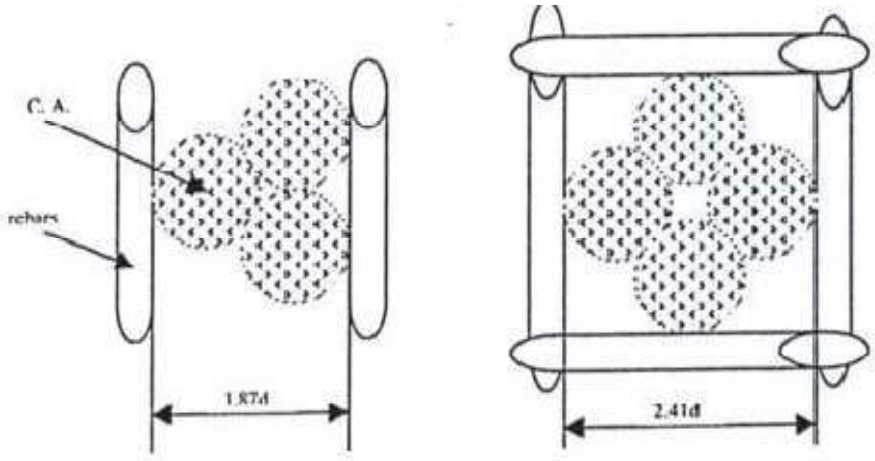


Figure I.5 : Critère de blocage et géométrie du calcul **[27]**

Cas 1: $$e_{\min} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) d \quad \textit{Avec d : diamètre maximal des granulats} \qquad \text{(I.1)}$$

Cas 2: $$e_{\min} = \left(1 + \sqrt{2}\right) d \quad \textit{Avec d : diamètre maximal des granulats} \qquad \text{(I.2)}$$

I.3.3.2. Ciment

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise, c'est à dire faire en sorte que le béton (ou la pâte de ciment) reste en phase dormante pendant une période suffisamment longue (de l'ordre d'une heure et demi) avant le passage à l'état solide. 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.) **[19].**

Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et á la durabilité du béton. Le rapport 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 **[19].**

I.3.3.3. Les ajouts minéraux

A. La fumé de silice

Le fumé de silice est un sous-produit industriel résultant du dépoussiérage des fumées issues des fours à arcs électrique dans lesquels sont élaborés du silicium et autres alliages. La fumée de silice se combine avec l'oxygène de l'air pour sonner de l'oxyde de silicium SiO_2 en quantité prédominante (> 90%). La taille fines de ses particules permet d'étendre la granulométrie de l'ensemble du squelette granulaire en comblant les vides et en augmentant la

compacité. En plus, sa structure amorphe permet de déclencher une réaction pouzzolanique par la consommation de la chaux et la création de nouveaux hydrates.

B. Cendres volantes

Les cendres volantes sont de fines particules résultats de la combustion du charbon dans une centrale électrique. En 1937 R. E. Davis de l'université de Californie présenta une étude sur l'utilisation des cendres volantes en cimenterie et depuis les études se sont multipliées et son utilisation s'est répandue à cause des améliorations apportées et l'économie enregistrée par son emploi.

C. Laitier des hauts fourneaux

Le laitier des hauts fourneaux est un sous-produit de l'usine sidérurgique formée essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subira un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment. L'utilisation de ce sous-produit date de plus d'une centaine d'années où on enregistre la première production d'un ciment au laitier en Allemagne (1892) puis aux USA (1896).

I.3.3.4. Les Superplastifiants

Les superplastifiants sont des formes avancées de plastifiants. Ce sont des produits qui peuvent être ajoutés au béton en plus petite quantité que les plastifiants, soit au plus 2% du poids du ciment, sans pour autant créer des effets secondaires (effet retardateur excessif, entraînement d'air). La compétition entre l'effet de défloculation et le ressuage détermine l'influence globale des superplastifiants sur la zone de transition inter faciale. Selon le rapport E/C utilisé, les superplastifiants peuvent avoir un effet bénéfique ou délétère. Avec un E/C de 0.55, le ressuage est dominant, ce qui occasionne une zone de transition inter faciale de moindre qualité dans la plupart des cas. Il s'agit par contre d'une situation extrême puisque l'utilisation des superplastifiants n'est généralement pas nécessaire à un tel rapport eau/ciment. Avec un E/C de 0,4, le compromis entre la défloculation et le ressuage se reflète bien, par l'excès de conductance inter faciale, l'ajout de superplastifiant et l'augmentation de son dosage apporte une meilleure dispersion des grains de ciment mais favorise également le ressuage. Le meilleur compromis est au point de saturation, où l'excès de conductance inter faciale est semblable avec et sans superplastifiant **[28].**

D'après des résultats antérieurs sur le même projet, à un E/C de 0,35, ces superplastifiants ont un effet bénéfique sur la zone de transition inter faciale. En conséquence, l'utilisation des superplastifiants comme réducteurs d'eau peuvent améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton. Il existe plusieurs générations de superplastifiants, correspondant à différents polymères ou différentes configurations de ces polymères, qui ont été élaborées au cours des dernières années **[28].**

Les superplastifiants peuvent être regroupés de la manière suivante :

- Le polymère de mélamine sulfonate (PMS) ;
- Le polymère de naphtalène sulfonate (PNS) ;
- Les lignosulfonates modifiés (LS) ;
- Les superpalstifiants à base de polyacrylate, polycraboxylate (pc) ou de polyéthylène.

I.3.3.5. L'eau de gâchage

L'eau utilisée ne doit pas présenter un excès d'impuretés **[29]** qui peuvent étériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, des armatures, etc.). Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats **[28].** 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. Flatt R.J et al **[29]** ont utilisé, avec succès, de l'eau recyclée pour la fabrication d'un béton auto plaçant dans le cadre de béton prêt à l'emploi.

I.3.3.6. 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 :

- 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.

En général les agents de viscosité utilisés sont des polysaccharides hydrosolubles **[30].** ont fixé 3 catégories générales pour les agents de viscosité :

Les polymères naturels, semi-synthétiques et synthétiques. Les agents de viscosité possèdent un rôle très important pour maintenir la stabilité des mélanges cimentaires. Ils assurent une cohésion entre les différentes phases d'un mélange, augmentant ainsi la résistance à la ségrégation des mélanges, et empêchent les mouvements libres d'eau, réduisant le ressuage. Au niveau rhéologique, ils agissent en augmentant à la fois le seuil de cisaillement et la viscosité des mélanges **[30].**

Les agents de viscosité peuvent avoir une seconde fonction, le retard de prise, ainsi que l'entraînement d'une certaine quantité d'air, entraînant des conséquences sur la résistance mécanique du béton. Les effets secondaires sont fonction du type et du dosage de l'agent de viscosité utilisé.

I.3.4. Avantages et inconvénients d'un béton autoplaçant

I.3.4.1. Avantages

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

A. La mise en place

Il paraît évident que le plus gros point fort des BAP apparaît à leur mise en place.

Premièrement, les dispositifs de vibration sont jetés aux oubliettes. On pourrait penser que cet avantage est uniquement financier. En effet, l'installation matérielle est réduite et la main d'œuvre nécessitée est diminuée.

Mais le côté financier n'est pas le seul avantage à ne pas vibrer le béton. On oublie souvent qu'un avantage majeur est la chute des nuisances sonores. Cela permet aux chantiers de grande envergure d'être mieux tolérés par le voisinage. De plus, les ouvriers travaillent dans des conditions beaucoup plus agréables.

Deuxièmement, la pose des BAP est optimisée par leur fluidité. Tous les coins des coffrages sont remplis et, surtout, il y a moins de problèmes d'hétérogénéité dans la dispersion du béton. Ils permettent donc des coffrages complexes et anguleux. Cette fluidité permet également à l'air de mieux circuler dans le béton, ce qui rend le coulage plus facile.

Enfin, les BAP permettent une pose moins contraignante, de nouveau grâce à la bonne coulabilité. En effet, la fluidité élevée nécessite moins de puissance de la part des pompes. Cela permet de réduire la taille de l'installation ou de mieux utiliser la puissance disponible. Les tuyaux de coulage peuvent ainsi être plus long et atteindre les endroits les plus escarpés des coffrages. Encore un avantage pour les coffrages complexes.

B. Les caractéristiques finales

Vu de l'extérieur, les BAP ont un très beau état de surface. En effet, la limitation de la taille du gros granulat permet l'obtention d'un béton plus lisse et donne l'impression d'une meilleure *finition*. Il est donc intéressant d'utiliser des BAP dans des constructions où l'on ne souhaite pas devoir recouvrir les surfaces. Notamment dans tous les bâtiments publics et les intérieurs, où le béton apparaît dans son état le plus brut. L'état de surface est tellement constant et précis que l'on peut incorporer des reliefs aux coffrages, afin d'y laisser des empreintes, pour l'esthétisme.

C. La maintenance du matériel

Comme dans tout travail, la pose d'un béton réclame un brin de nettoyage et d'entretien systématiques. Les bétons autoplaçants sont plus souples à l'utilisation que les bétons classiques. En effet, leur fluidité accrue permet un rinçage des tuyaux et un nettoyage des pompes plus aisés car il y a moins de gros morceaux à dégager. De plus, la réduction de la taille des gros granulats vient corroborer cet avantage. Ainsi, le matériel de pompage est moins vite abîmé.

I.3.4.2. Inconvénients

A. La fabrication

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants.

B. Le coût dépend du temps

Comme les bétons autoplaçants sont plus liquides, leur prise est plus lente. Cela peut engendrer des dépenses supplémentaires, notamment dans la construction des coffrages. En effet, il n'est pas rare de réutiliser des coffrages à plusieurs reprises (particulièrement les coffrages métalliques) mais ces derniers sont monopolisés plus longtemps, à cause de cette lenteur. Il faut donc parfois investir plus largement en matériel, ce qui ne fait jamais vraiment plaisir à l'entrepreneur. C'est le prix à payer pour avoir le si bel état de surface que l'on connaît aux bétons autoplaçants.

Pour le placement, il faut également tenir compte des conditions météorologiques. Surtout pour le gel puisque le béton est plus humide et y est beaucoup plus sensible.

I.3.5. Formulation des bétons autoplaçants

Différentes méthodes de formulation des BAP existent dans la littérature, elles sont basées pour la plupart sur une méthodologie expérimentale plus ou moins contraignante. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Les fabrications des BAP majoritaires sont fait impérativement en centrales de béton prêt à l'emploi (BPE) et notamment l'industrie du bâtiment qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, on sait que ces résistances mécaniques sont facilement atteintes dans le cas des BAP **[31].**

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

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

De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales et quelques de ses modifications **[31].**

Avec le retour d'expérience, l'AFGC (AFGC, 08) recommande des valeurs limites des constituants des BAP, facilitant ainsi le travail du formulation :

- Volume de gros granulat limité en prenant un rapport G/S (masse de gravier sur masse de sable) proche de 1 et un diamètre maximal D_{max} compris entre 10 et 20mm,
- Volume de pâte qui varie entre 330 et 400 l/m3,
- Dosage de ciment supérieur ou égal au minimum requis par la norme NF EN 206-1 (NF EN 206-1, 12), soit en général et selon la durée d'exposition entre 300 et 350 kg/m3. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m3,
- Dosage en superplastifiant doit maintenir une fluidité nécessaire afin d'obtenir un étalement et une vitesse d'étalement importants.

On distingue deux grandes familles de formulation des BAP suivant leurs compositions

- La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m3) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée). L'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent de contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.
- La deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires, les laitiers granulés, les cendres volantes, les fumées de silices, etc…, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant

nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité donnée est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratations raisonnables.

I.3.5.1. Formulation OKAMURA (La Méthode Générale)

Cette méthode a été développée par Okamura et Ozawa, deux chercheurs de l'université de Kochi au Japon **[32].** L'idée principale des deux chercheurs est basée sur l'obtention d'un béton autocompactant. Celui-ci nécessite une grande déformabilité et une viscosité appropriée de la pate ou du mortier pour que le béton puisse s'écoule a travers des sections étroites sans ségrégation entre les gros granulats et le mortier **[32].** Pour obtenir un BAP, la première démarche de cette méthode consiste a limiter le volume du gravillon a 50% du volume des solides contenus dans le béton, c'est-a-dire :

$$G = \frac{50}{100} G_{\text{lim}} (1 - A) \qquad \textbf{(Equation I.2)}$$

Ou V_{Glim} : volume absolu d'un mètre cube de gros granulats ;

A : teneur en air choisie en fonction de la résistance au gel-dégel.

De même, le volume du sable est fixe a 40% du volume total du mortier (**Figure I.6**). Les propriétés du mortier recherchées (grande déformabilité, viscosité adéquate) sont obtenues grâce à l'utilisation d'une forte teneur en poudre et d'un SP avec un dosage efficace **[32].** Les étapes fondamentales de cette méthode sont résumées comme suit :

- Le volume d'air est suppose égal a 1% en absence de l'adjuvant entraineur d'air, et 4 a 7% dans le cas contraire;
- La quantité de gravillons est fixe a 50% de leur compacité;
- La teneur en sable est limitée a 40% du volume du mortier;
- Le rapport Eau/poudre (E/P) est suppose égal a 0,9 a 1% par volume, tout dépend des propriétés de la poudre;
- Le dosage en superplastifiant et le rapport E/P final sont ajustes dans les mortiers.

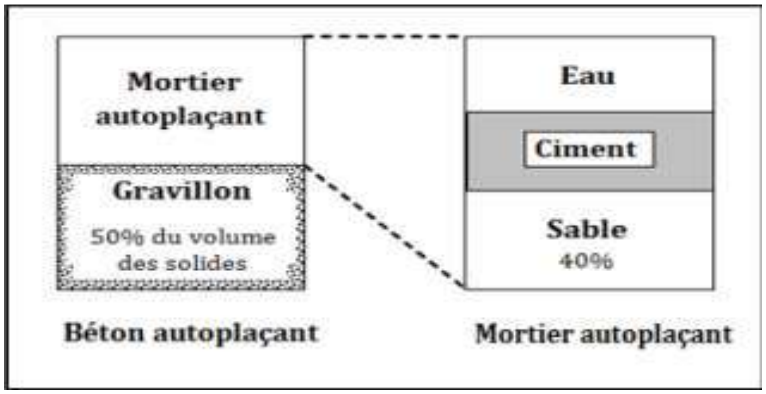


Figure I.6 : Proportions du gravillon et du sable d'un béton autoplacant selon la méthode générale **[33]**

L'ajustement du rapport E/P et du dosage en SP passe par la réalisation des essais préliminaires sur le mortier : essai d'étalement au mini-cône et essai d'écoulement au mini-entonnoir suggérés par plusieurs chercheurs (**Figure I.7**) **[34]**.A travers ces essais, on mesure le diamètre final d'étalement et le temps d'écoulement, puis on calcule es deux paramètres suivants :

- Etalement relatif :

$$Tm = \frac{d^2 - d_0^2}{d_0^2} \qquad \textbf{(Equation I.3)}$$

- Vitesse d'écoulement relative :

$$Rm = \frac{10}{t} \qquad \textbf{(Equation I.4)}$$

Ou T_m : étalement relatif ;

d : Diamètre d'étalement en cm ;

d_0 : Diamètre inferieur du mini-cône en cm ;

R_m :vitesse d'écoulement relative ;

t : Temps d'écoulement en seconde.

L'étalement relatif permet d'identifier la déformabilité du mortier (plusT_m est grand, plus le mortier est déformable), alors que la vitesse d'écoulement relative représente la viscosité (plus R_m est petit, plus le mortier est visqueux). Pour obtenir un béton autoplacant de bonnes caractéristiques a l'état frais, de nombreux chercheurs **[35]** et **[36]** ont recommandée des valeurs d'étalement relatif et de vitesse d'écoulement Relative respectivement de $\mathbf{T_m} = 5$ et $\mathbf{R_m} = 1 \pm 0{,}1$.

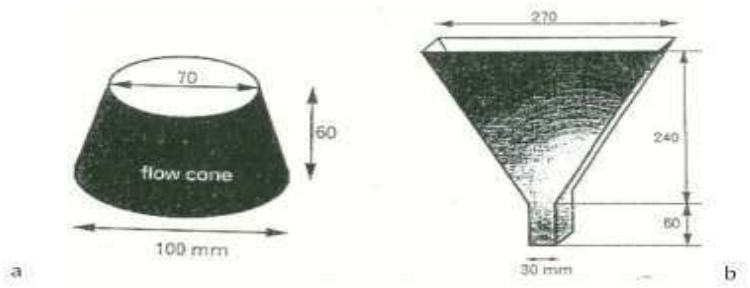


Figure I.7: Caractérisation du mortier **[37]**

I.3.5.2. Formulation CBI (Méthode Suédoise)

En se basant sur les travaux de **[38]** et **[39],** l'institut suédois de ciment et de béton (CBI) a propose une méthode de formulation des BAP.

Cette méthode est basée principalement sur le critère de blocage. Son objectif est de produire un BAP économique en cherchant le volume maximal de granulats (volume minimal de pate) permettant d'éviter le risque de blocage **[40].** L'avantage de cette méthode est sa prise en considération des conditions de chantier telles que le diamètre des barres et l'espacement entre les armatures.

Dans cette méthode, le critère de blocage est propose (dépend du type de granulats et de leur taille d'un cote, et de diamètre des barres et de leurs espacements de l'autre cote), et le volume maximal de granulats est calcule **[40].** Le rapport gravillons/granulats est choisi de telle manière à avoir le minimum volume des vides dans le squelette granulaire, ce qui nécessite un faible volume de pate pour les remplir. Le rapport E/C et le type du ciment sont choisis en fonction de la résistance et la durabilité du béton recherchées.

Le critère de blocage est ensuite teste au moyen de la boite en L. pour éviter ce risque, le taux de blocage doit être entre 0,8 et 1 **[41]**. L'essai d'étalement doit être aussi fait pour tester la déformabilité et l'homogénéité du BAP. Un étalement supérieur a 70 cm est recommande pourvu que le BAP soit homogène et ne présente aucune tendance de ressuage ou de ségrégation.

Cette méthode propose une bonne contribution granulaire, ce qui nécessite un volume de pate moins important. Néanmoins, la courbe permettant de déterminer le critère de blocage n'est pas général, et il est difficile de la tracer pour chaque type de granulats.

I.3.5.3. La 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. 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 présentés ci-après **[42]**

- 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 général0.13m^3/m^3. dans les autres cas, une valeur standard devra être déterminée entre 0.16 et 0.19 m^3/m^3.
- La quantité d'air dépend du diamètre maximum du gros granulat, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4.5% d'air.

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

I.3.5.4. Formulation LCPC (Méthode française)

Cette méthode, qui a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC) par Sedran et De Larrard, vise à économiser la production des BAP tout en cherchant la compacité optimale des grains solides (des poudres aux gravillons) permettant d'obtenir un béton de grande ouvrabilité, de meilleure résistance en utilisant un volume de pate moins important **[43].**

La méthode française est basée sur le modèle d'empilement compressible du squelette granulaire **[44].** Ce modèle prédit la compacité réelle du squelette granulaire a partir des propriétés des ses constituants (poudre, sable et gravillons) telles que la granulométrie, la densité, les proportions du mélange et la compacité propre. Le comportement du béton à l'état frais est modélise a partir de sa compacité granulaire **[44].**

Cette méthode nécessite de faire quelques essais pour déterminer la teneur en eau et le dosage en superplastifiant et le dosage a saturation du SP. Connaissant ces paramètres et ceux cites en haut et de l'effet de paroi, et grâce au logiciel Betonlab-Pro2, les dosages des constituants sont détermines **[43].**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 viscosité est fixée de manière arbitraire à $5.\ 10^4$ La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

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

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

Pour pouvoir utiliser de façon pratique le modèle d'empilement compressible, les auteurs l'ont fait intégrer dans un logiciel nomme Betonlab-Pro2 **[43].** Le comportement rhéologique du béton est évalue en utilisant un rhéomètre appelé BTRHEO qui a été développe au LCPC. Cependant, comme cette méthode est développée sur la base de l'utilisation du rhéomètre BTRHEOM et du logiciel RENE-LCPC. Il est difficile donc aux autres chercheurs de l'utiliser sans avoir ces deux moyens.

I.3.6. Discussion et comparaison entre les différentes formulations

Etant donné que les différentes méthodes de formulation sont basées sur différents critères, la comparaison est difficile et nous pourrons dire que suivant les méthodes et vu la sensibilité de la formulation des BAP, les formulateurs doivent

- Etablir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour assurer la fluidité du béton mais aussi son homogénéité,
- Jouer sur les dimensions et le volume des gravillons en gardant une certaine limite qui reste à bien définir pour éviter le phénomène de blocage, car la réduction du volume de la pâte et l'utilisation des gravillons de petites dimensions influe négativement sur la résistance mécanique dans la gamme usuelle des bétons.

L'approche japonaise par sa simplicité présente un cahier des charges qui offre des teneurs en granulats arbitraires et faibles par rapport à d'autres approches, à notre avis pour garantir l'absence de tout blocage. Notons aussi que les auteurs ne précisent pas la nature des gravillons (roulés ou concassés) qui influe sur l'existence ou non de phénomène de blocage.

Les chercheurs du LCPC ont fait un travail considérable sur la formulation des bétons hydrauliques et sur le problème de rhéomètre, mais leurs études présentent deux limites :

- les paramètres rhéologiques sont propres au BTRHEOM, et que tout le monde n'utilise pas ce rhéomètre. Il reste toujours intéressant de comparer leurs résultats avec d'autres rhéomètres.
- La formulation des BAP utilisée est peu réaliste sur le plan industriel (le dosage en ciment est élevé, la complexité de l'approche imposant des paramètres tels que les coefficients de confinement propres à leur expérience).

De manière générale, toutes les approches de formulation présentées n'avaient pas été appliquées pour des BAP contenant des agents de viscosité, souvent employés pour améliorer la plasticité, et contenant des entraîneurs d'air, utilisés pour l'obtention de meilleurs parements.

D'autre part, la lecture de la littérature ne montre pas si les différentes approches, issues du laboratoire, ont été validées sur site à partir d'essais en vraie grandeur, afin de mieux appréhender le blocage et la ségrégation **[45].**

I.3.7. Caractérisation des BAP

I.3.7.1. Propriété de PAB à l'état frais

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant sont fluidité et l'homogénéité.

Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage **[18], [46]. La figure I.8** montre les propriétés clés du autoplaçant à l'état frais.

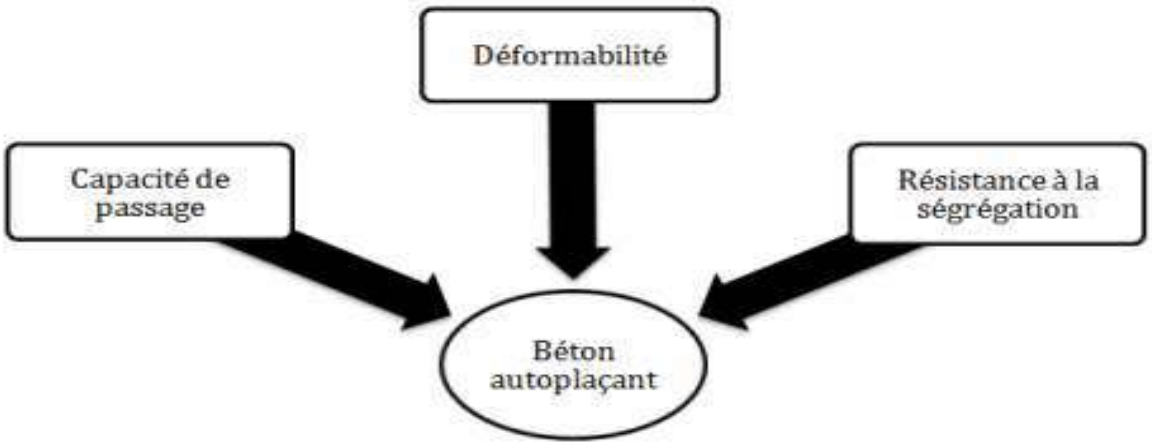


Figure I.8 : Propriétés clés du béton autoplacant à l'état frais **[46]**

A. Le 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.

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 **[46].**

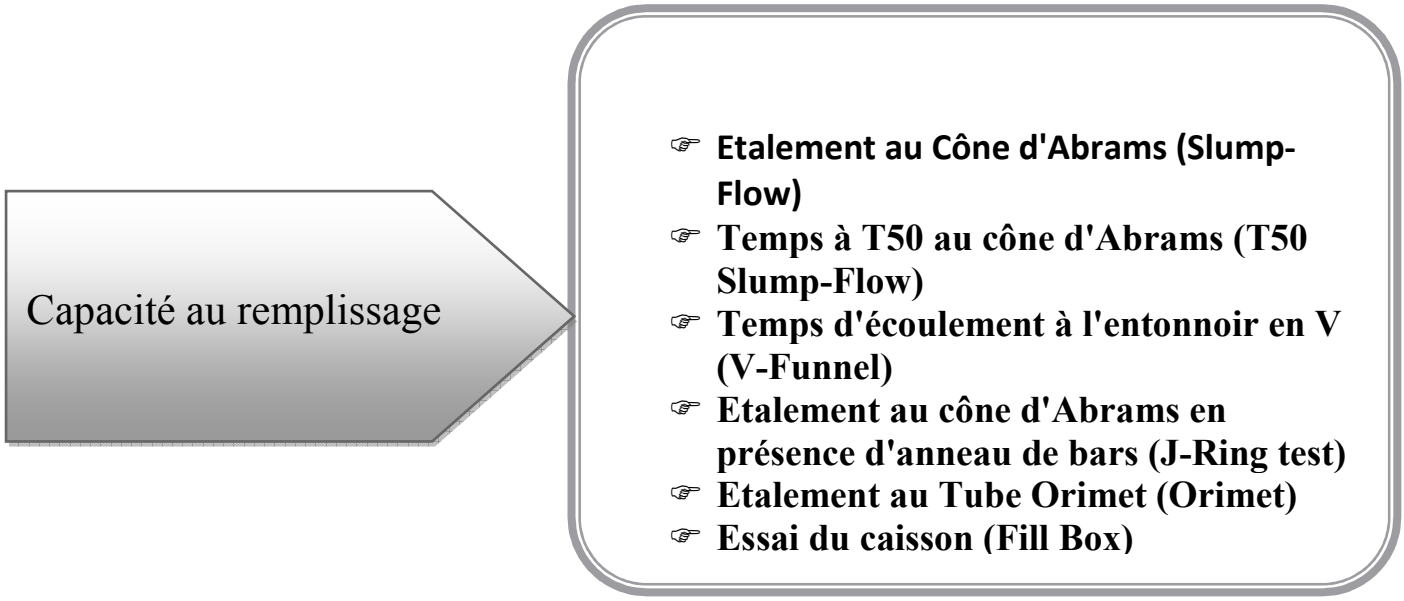


Figure I.9 : Schéma représente les essais permettant la détermination de la capacité de remplissage

B. 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 **[47].**

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différents, comme la séparation entre la pâte de ciment et les granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinés, et une réparation non homogène se l'air occlus. Pour éviter la ségrégation, il faut réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton .La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité.

C. 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. Cependant, dans les milieux confinés, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures.

En effet, le blocage des granulats est provoqué par la quantité importante de granulats dans le béton, et par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armature ou dans un confinement **[47].** Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de (**Figure I.10)** ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

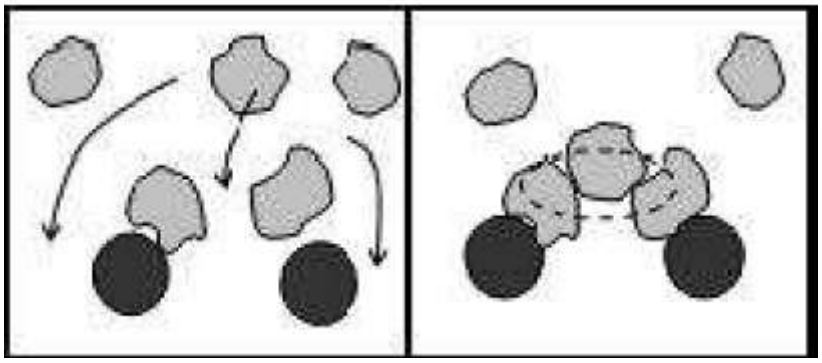


Figure I.10 : Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures **[47]**

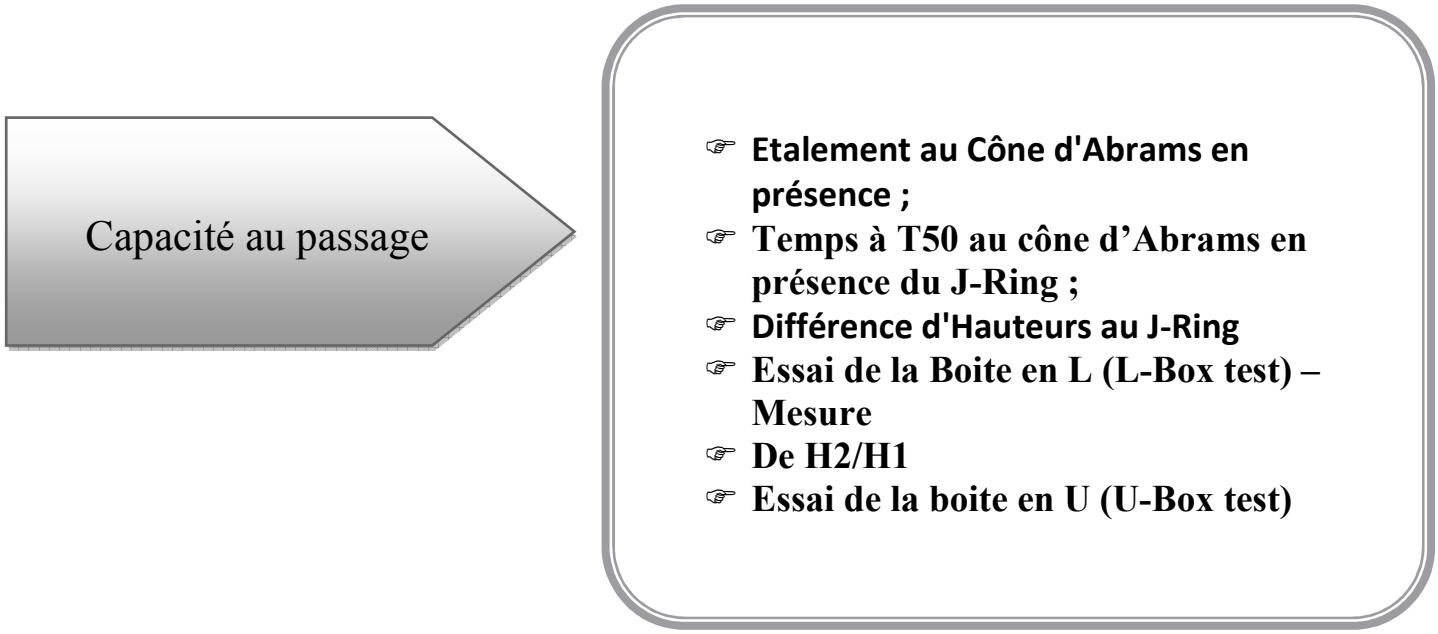


Figure I.11 : Schéma représente les essais permettant la détermination de la capacité de passage

Donc un béton est qualifié d'autoplaçant s'il les propriétés citées ci-dessous (**tableau I.1**), en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation **[48].** Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre.

Tableau I.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP **[48]**

Propriétés d'un béton	**Moyens d'obtention**	**Actions à mener dans la formulation**
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation des superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Réduction du rapport E/C
		Utilisation de matériaux de grande surface
		Utilisation d'agents de viscosité
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

I.3.7.2. Essais de caractérisation des BAP à l'état frais

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels : les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant, l'affaissement étant ici « total ».

C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développe toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante de l'opérateur. La (**Figure I.12**) illustre la diversité des dispositifs expérimentaux proposés **[49].**

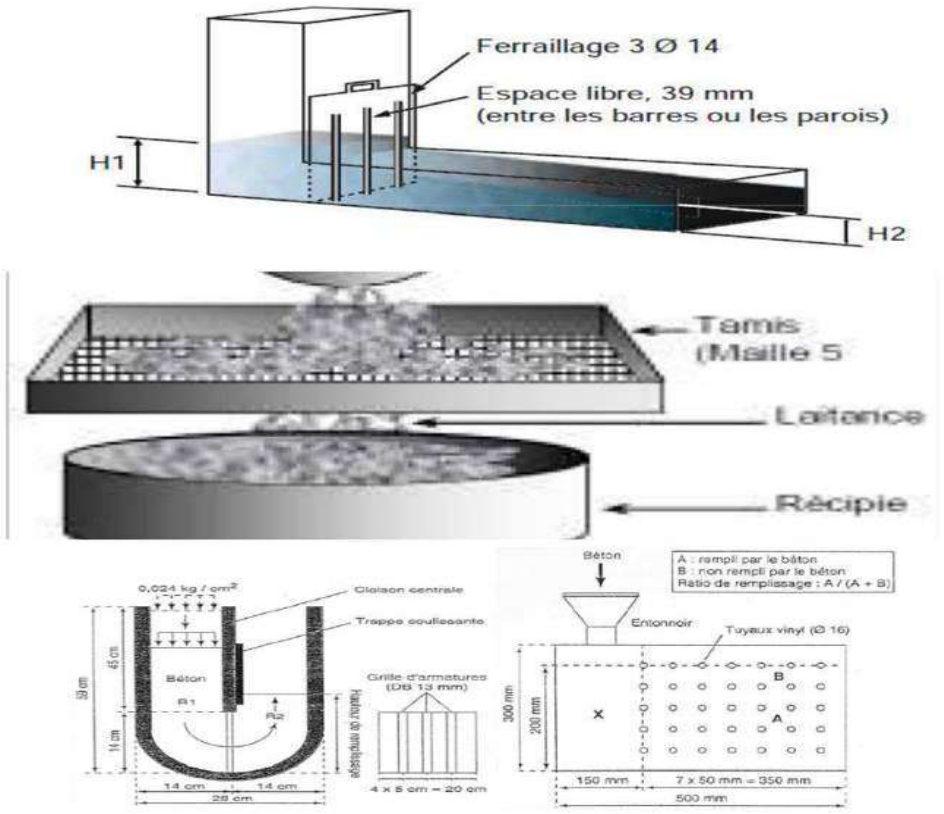


Figure I.12 : Dispositifs expérimentaux

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales **[50]**

- **Mobilité en milieu non confiné (**d'écrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams) ;
- **Mobilité en milieu confiné** (d'écrit par l'essai d'écoulement à la boite en L) ;
- **Stabilité** (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

A. Mobilité en milieu non confiné

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams. Illustré dans la (**Figure I.13**).

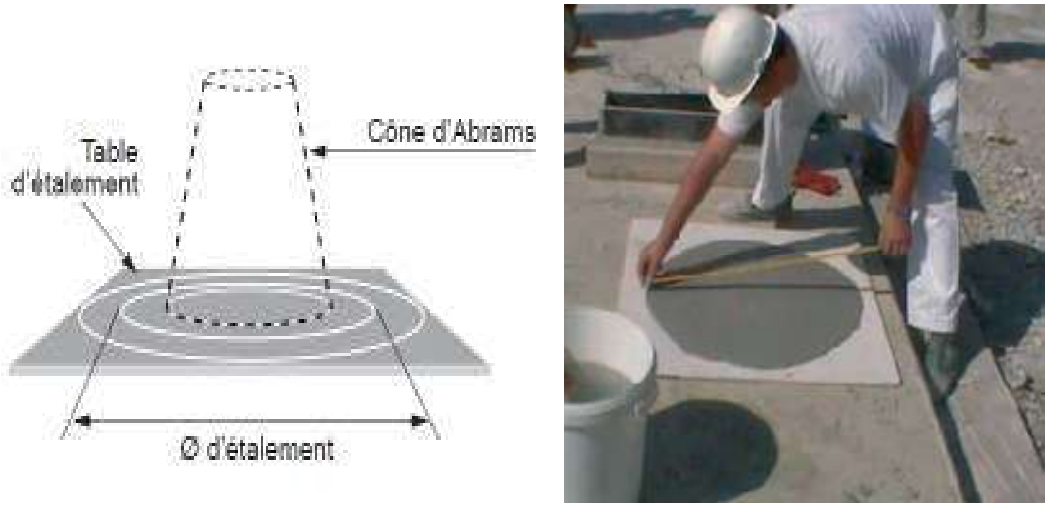


Figure I.13: Essai d'étalement au cône (Slump flow) **[17]**

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en ouvre.

Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier. Le matériel utilisé pour pratiquer cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis à le soulever et à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue **[17].**

Essai au v-funnel présenté la (**figure I.14)** fournit une indication sur la viscosité du béton en mesurant le temps d'écoulement de 12 litres de béton à travers un entonnoir de section carrée.plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux **[51].**

D'après les spécifications deux classes de viscocité ont été définies :

- VF1 si le temps d'écoulement « t » est inferieur à 8 s.cette classe correspond à $T_{500} \leq 2$s.
- VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25 s.cette classe correspond à $T_{500} \geq 2$s.



Figure I.14 : Essai à l'Entonnoir pour mortier **[51]**

B. Mobilité en milieu confiné

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (**Figure I.16)** fait partie de ces essais. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

On s'assure que la boite est placée sur un support horizontal et on humidifie l'intérieur. La partie verticale de la boîte 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 boîte à travers le ferraillage. La distance libre entre les barres est de 41 mm dans la configuration à trois barres qui correspond à des ouvrages de génie civil très ferraillées (typiquement 100 à 350 kg/m³ avec un espace libre entre les barres d'au moins 60 mm). Pour des ouvrages moins ferraillés (application en bâtiment en particulier), on pourra alléger la grille de ferraillage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre entre les barres de 59 mm (**Figure I.15**) **[17].**

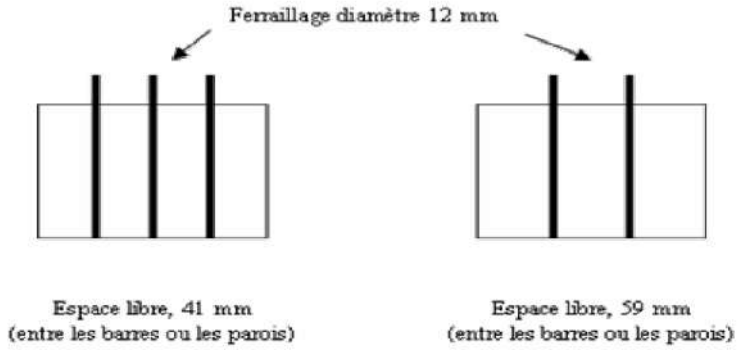


Figure I.15 : ferraillage de la boîte en L (L-box test) **[17]**

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage PA = H1/H2 en arrondissant à 0,05 près. On mesure H1 du côté de la trappe (i.e. côté intérieur de la partie verticale de la boîte).

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en amont de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

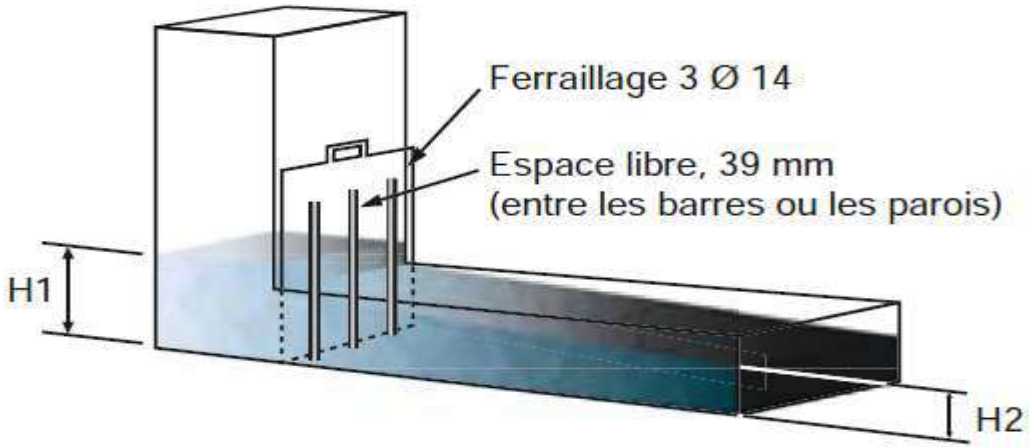


Figure I.16 : Essai de la boîte en L (L-box test) **[17]**

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

La (**Figure I.17**) ci -dessous présente l'essai du tube en U (à gauche) et du caisson (à droite) **[50].**

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 est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, et les spécifications des différents pays) **[50].**

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. Si le béton coule aussi librement que l'eau, au repos on aura une surface horizontale (h2-h1=0). Un béton peut être considéré comme autoplaçant si cette différence d'hauteur se rapproche le plus cette valeur nulle **[50].**

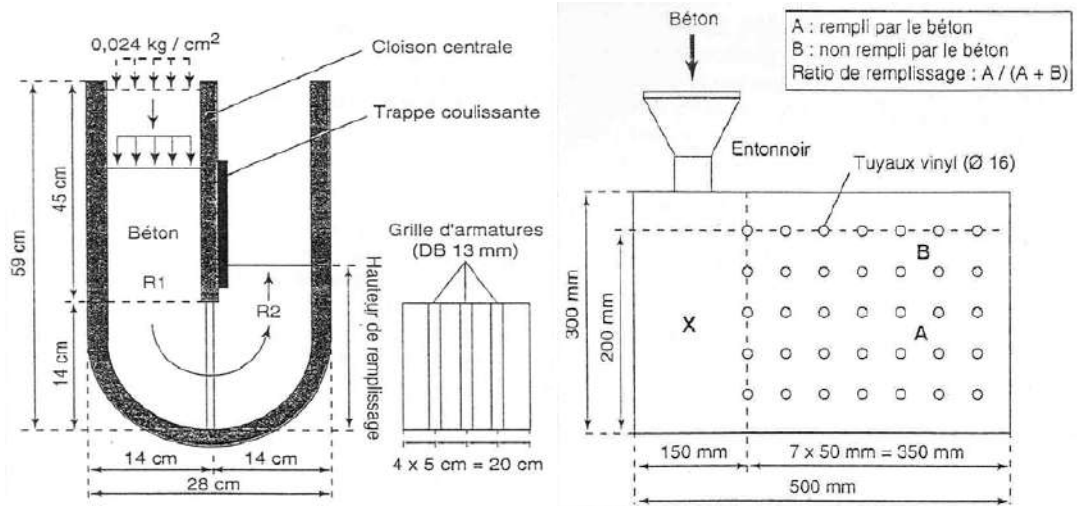


Figure1.17 : Essai du tube en U (à gauche) et du caisson (à droite) **[50]**

C. Stabilité

L'aptitude d'un BAP à rester homogène une fois coulé est aussi importante que celle durant la mise en place. L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée **[50].**

C.1. Résistance à la ségrégation

L'essai de stabilité de référence n'existe pas encore mais la résistance à la ségrégation statique d'un BAP doit impérativement être caractérisée. Différents tests peuvent être utilisés pour caractériser cette capacité d'un BAP à rester homogène après sa mise en place jusqu'au début de prise **[50].**

Un de ces essais est celui dit de « stabilité au tamis », développé par GTM (**Figure I.18**) [AFGC 00], qui consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 % **[51].**



Figure I.18 : L'essai de stabilité au tamis **[51]**

D'autres essais comme l'essai à la bille **[35]**, qui consiste à mesurer le temps d'enfoncement d'une bille pesante dans un échantillon de béton, et l'essai à la colonne LMDC, qui permet de comparer les analyses granulométriques des granulats en fonction de la hauteur d'une colonne de béton (**Figure I.19**), sont aussi utilisés.

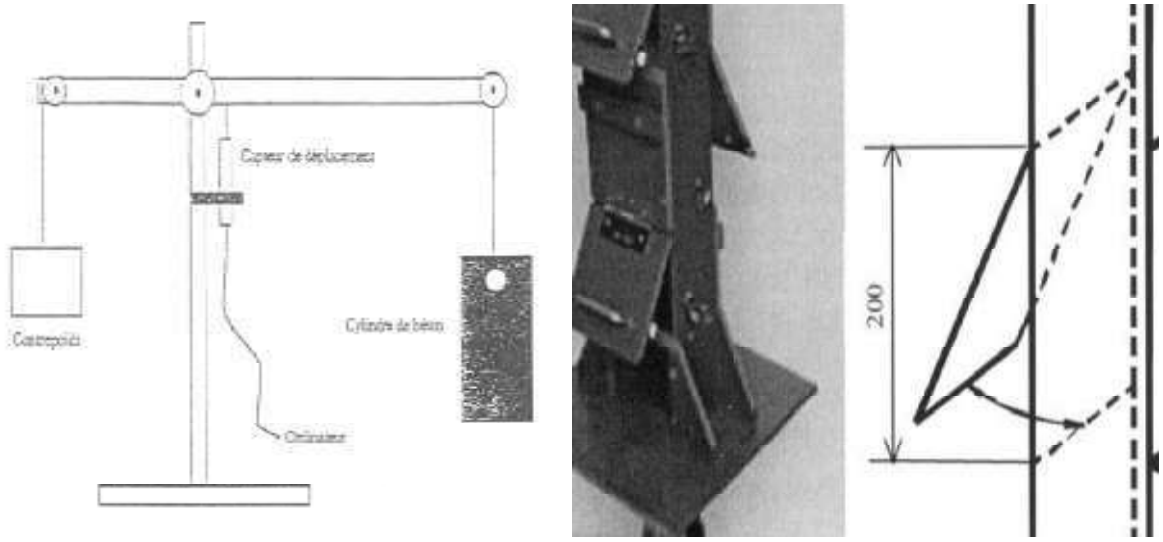


Figure I.19: Essai à la bille (à gauche) et à la colonne (à droite) **[35]**

C.2. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, **Figure I.20**) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [AFGC 00]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé **[50].**

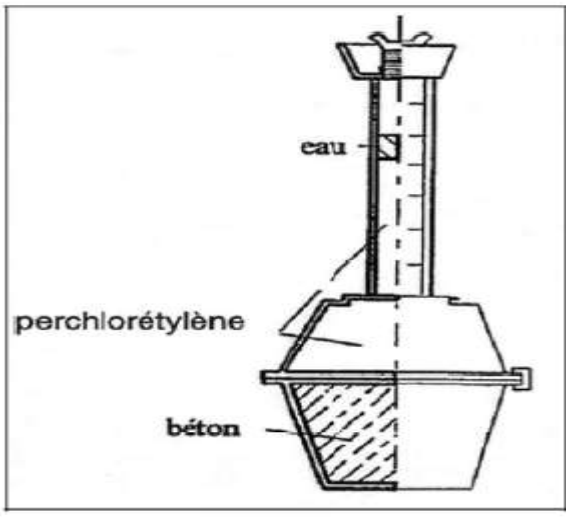
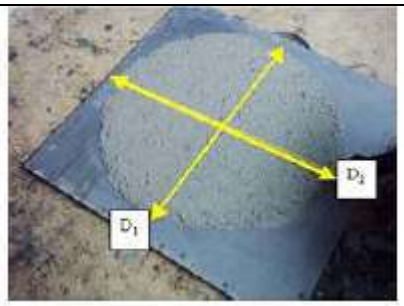


Figure I.20: Essai de ressuage à l'aéromètre **[50]**

Tableau I.2 donne la fourchette recommandé des essais précédents

Tableau I.2 : Spécificités les plus courantes d'un BAP à l'état frais **[52]**

Essai	Grandeur spécifique	Valeur recommandée	Photos
Etalement	SF (mm)	650≤SF≤750	

Etalement	T_{500}	$2 \leq T_{500} \leq 5$	
Tamis	SR (%)	$2 \leq SR \leq 20$	
L-Box	H_2 / H_1 (%)	≥ 80	
V-Funnel	T_v	$8 \leq T_v \leq 12$	

I.3.7.3. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci

Comme tous les bétons, le BAP peut être proportionné pour avoir des propriétés à l'état durci considérablement variable **[53].** Les différences de ces propriétés entre le BAP et le béton traditionnel peuvent être attribuées à trois sources principales : proportion modifiée du mélange, microstructure et homogénéité améliorées et manque de vibration ce qui élimine les défauts et assure la distribution uniforme des granulats.

Afin d'évaluer les caractéristiques des BAP, plusieurs travaux de recherches ont été introduits. Les différentes approches de formulation, varient les propriétés durcies associés au BAP d'une taude à une autre.

A. Propriétés mécaniques

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition.

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange

(retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait **[50].**

A.1. Résistance mécanique

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées

par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite **[50].**

Différentes données ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes montré dans la (**Figure I.21**).

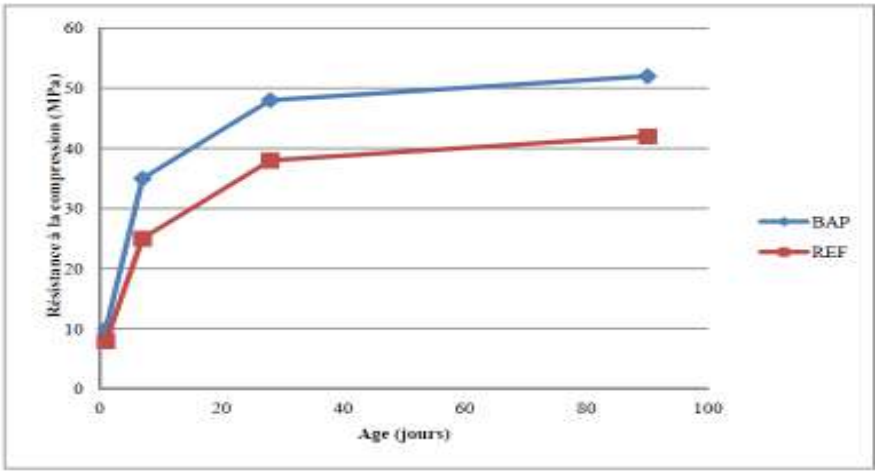


Figure I.21 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un béton de référence (REF) correspondant **[50]**

De plus, certains auteurs affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (**Figure I.22**). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

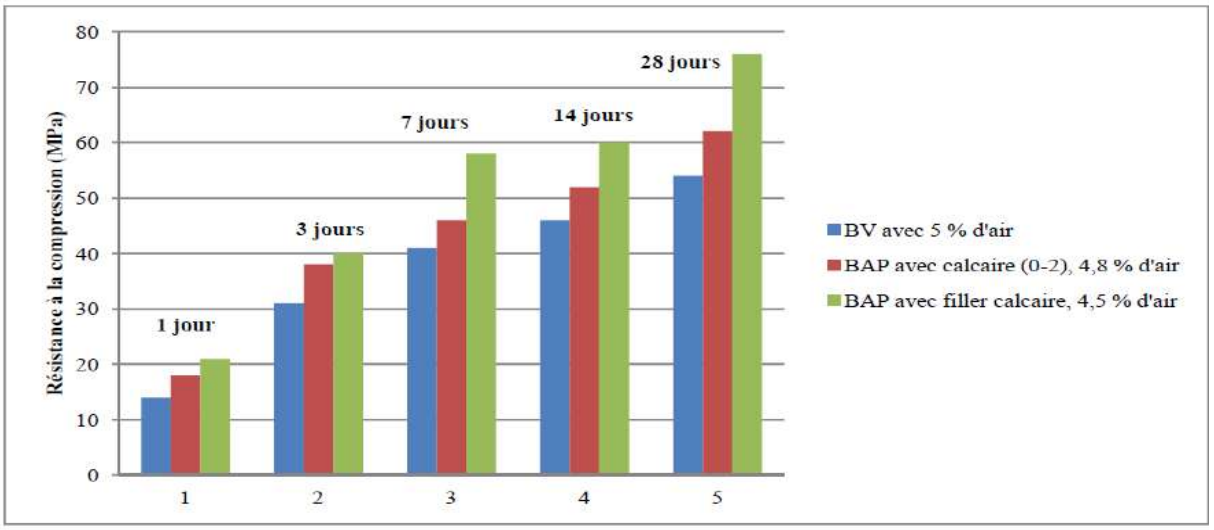


Figure I.22 : Résistance mécanique d'un béton vibré (BV) et de deux BAP (De formulation différente) **[50]**

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. 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 **[50].**

A.2. Le retrait

Le retrait est une variation dimensionnelle du béton en l'absence de chargement, du à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. **[54]** Le siège du retrait se situé dans la pâte du ciment (**Figure I.23**).

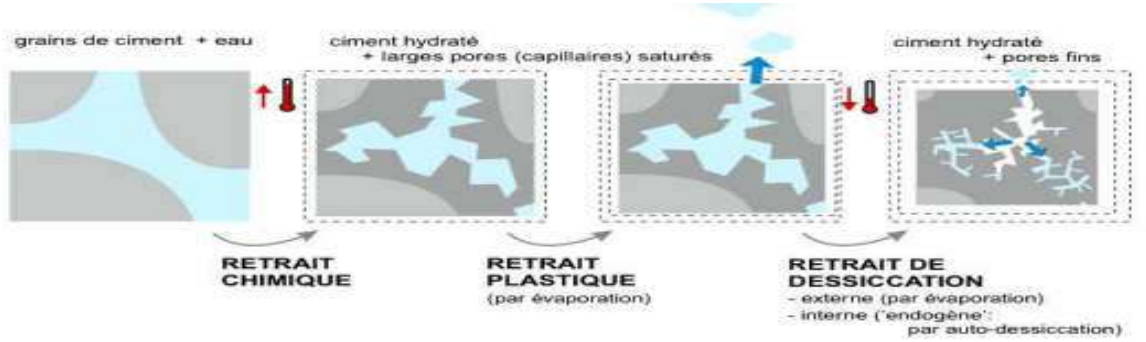


Figure I.23: Phénomène du retrait **[54]**

Au moment du coulage, le béton est un mélange de particule en suspension. Pendant cette période, dite dormante, les réactions d'hydratation commencent et les premiers hydrates se forment. Le volume de ces hydrates étant inférieur aux réactifs, ce qui conduit à un retrait chimique appelé la contraction de Le Chatelier **[55].**

Avant le début de prise, le béton se trouve en phase plastique non cohésive. Pendant cette période, l'eau de gâchage n'est pas encore liée aux constituants du ciment, elle n'est retenue que physiquement et mécaniquement donc elle peut s'évaporer comme elle peut être absorbée par un coffrage en bois trop sec ou par des granulats poreux non humidifiés, et le béton subit une contraction volumique nommée retrait plastique qui est une déformation libre due à des phénomènes physico-chimiques (la gravité, les réactions d'hydratation, et les échanges thermiques avec l'extérieur) **[56].**

Ce retrait est d'origine exogène, la déformation engendrée se produit pendant un temps limité. Elle apparait dés que la surface d'exposition est exempte de l'eau de ressuage et son début coïncide avec le début de la prise qui est aussi la fin du ressuage. La fin de la période du retrait coïncide à peu près avec la fin de la prise **[57].** A partir du début de prise, le volume des hydrates augmente et forme un squelette de plus en plus dense. Comme l'eau dans les

pores ne peut pas compenser la diminution du volume, elle se transforme en vapeur ; ce qui engendre des tensions capillaires et par la suite, une compression du squelette rigide (retrait d'auto-dessiccation).

Après la prise, le béton subit trois types de retraits.

- **Le retrait thermique :** Cette contraction se manifeste pendant un temps variant de quelques dizaines d'heures à quelques semaines après la mise en oeuvre du béton. Elle est due au fait que les réactions d'hydratations du ciment sont fortement exothermiques. Ce retrait provoque l'élévation de la température au sein du béton et par la suite sa diminution jusqu'à la valeur initiale ; ce cycle est accompagné d'une expansion suivie d'une contraction **[57].**
- **Le retrait endogène :** Contraction dû à l'hydratation du ciment, dit endogène parce qu'il est relié aux matériaux avec absence de tout échange d'eau avec l'extérieur. Connu sous le nom d'autodissociation qui est une conséquence macroscopique de la contraction chimique qui augmente avec la diminution du rapport eau/ciment **[58], [59].** Certains auteurs, [**60]** ont annoncés que les bétons autoplaçants particulièrement ceux confectionnés avec la fumée de silice ont un retrait endogène plus important à celui des bétons ordinaires du fait que la taille moyenne des pores est réduite **[60].**
- **Le retrait de séchage :** Est un retrait de dessiccation qui se développe à partir de la surface de l'élément de béton durci exposé à l'air ambiant, son intensité dépend de la réserve d'eau disponible dans le matériau après les réactions d'hydratation, et donc directement du rapport E/C et de l'hygrométrie ambiante. L'eau contenue dans les pores s'évapore vers le milieu ambiant et crée une contraction de l'élément en béton **[59].**
- La cause principale du retrait de séchage est l'assèchement progressif de la pâte du ciment. Lorsqu'on abaisse graduellement le taux d'humidité on observe que certaines catégories de pores s'assèchent en premier **[58], [61].**
- Dès que l'humidité est inférieure à 100 %, c'est l'eau libre dans les grands pores capillaires (> 0,05 μm) qui commence à s'échapper (zone A) (**Figure 1.24**). Cette perte d'eau provoque relativement peu de retrait.
- Pour des taux d'humidité compris entre 50% et 90%, C'est l'eau non-libre qui s'évapore. Cette évaporation provoque un retrait important (zone B).

- Lorsque le taux d'humidité devient inférieur à 50%, l'eau adsorbée dans les petits capillaires commence à s'évaporée. Ce processus produit des tensions capillaires qui compriment les parois des pores et provoquent une diminution de volume de la pâte.

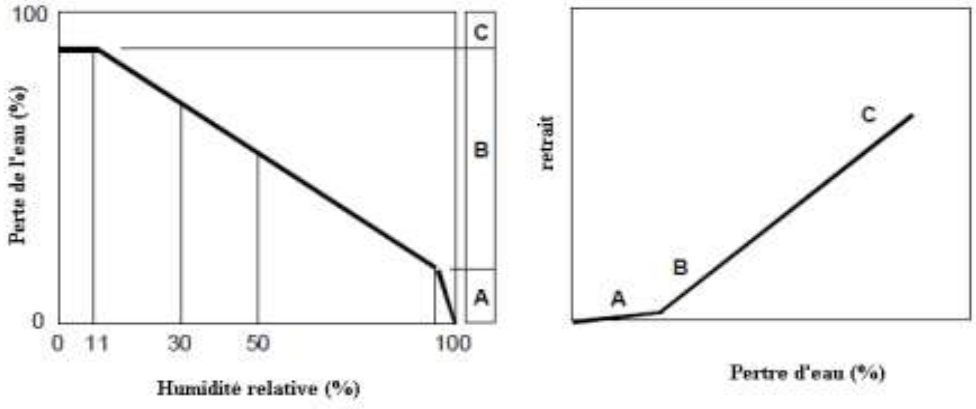


Figure I.24 : Relation entre la perte d'eau, l'humidité relative et le retrait de séchage de la pâte de ciment hydraté **[61]**

A.3. Fluage

Les déformations différées d'un ouvrage en béton comportent des déformations libres (retrait endogène, retrait de dessiccation) et des déformations dues aux diverses charges appliquées.

Les déformations du béton soumis à l'action d'une charge instantanée (charge inférieure à 30 à 50% de la charge de rupture) conduisent à des contraintes réversibles qui suivent la loi de Hooke : $\sigma = E.\ \varepsilon$

Avec σ la contrainte appliquée, E le module d'élasticité, ε la déformation.

Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la "viscosité" du béton intervient et la déformation résultante augmente graduellement avec le temps. Il y a fluage du béton qui se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique **[50].**

Les études sur le fluage sont encore peu nombreuses, en tout cas par rapport à celles sur le retrait .Cela explique peut-être pourquoi les résultats sont plus homogènes. Le fluage des BAP parait comparable à celui des bétons ordinaires de même résistance, en mode endogène ou en mode dessiccation **[50].**

Au cas où le fluage du béton aurait un rôle significatif sur le comportement de l'ouvrage, il est recommandé de déterminer sa valeur au moyen d'essais, car il est difficile, en l'état actuel des connaissances, de donner des indications fiables sur la différence existant entre le béton

BAP et le béton vibré .Les essai sont en effet peu nombreux, leurs résultats sont souvent contradictoires et font ressortir des différences, heureusement peu importantes.

B. Propriétés physico-chimiques et durabilité

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 perméation, la diffusion et l'absorption. La perméation 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 [**50].**

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la minéralogie des granulats pour l'alcali-réaction).

Les règles applicables pour les bétons courants restent donc normalement applicables aux BAP (norme XP 18-305 maintenant NF EN 206-1, ou fascicule 65A). Là encore, la durabilité est une propriété qui a été relativement peu étudiée pour les BAP jusqu'à présent. Les données de la littérature dans ce domaine concernent la microstructure des bétons autoplaçants, la perméabilité (aux gaz), la migration des ions chlore, l'absorption d'eau, la carbonatation et leur résistance au gel - dégel **[50].**

Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par :

- un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques. Les plus fines d'entre elles permettent d'accroître la compacité du squelette granulaire et aussi de diminuer l'épaisseur et la porosité des auréoles de transition (interfaces pâte –granulats, zone plus poreuse avec des pores plus gros).

En ce qui concerne la densité du réseau de bulles d'air, celle-ci dépend de l'utilisation ou non d'un entraîneur d'air spécifique mais également de l'effet entraîneur d'air du superplastifiant et/ou de l'agent de viscosité utilisés. La durée de malaxage est également un facteur important: un malaxage prolongé peut multiplier par deux le volume d'air occlus **[50].**

I.3.8. Fabrication, Transport et Mise en ouvre des BAP

I.3.8.1. Fabrication

La formulation des BAP est plus pointue que celles des bétons traditionnels, nécessite la mise en place de procédures de fabrication et de contrôles adaptées.

La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP; le temps de malaxage est toutefois légèrement plus long que pour un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants, soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés…).

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange en tenant compte de façon permanente de celle des granulats. Un contrôle renforcé des constituants doit être mis en place tout au long de la fabrication afin de maintenir la régularité de l'ensemble des performances.

L'hyperfluidité du béton conduit, à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en ouvre **[62].**

I.3.8.2. Transport

En raison de sa fluidité élevée, le BAP ne peut être transporté qu'au moyen d'un camion malaxeur. Il est indispensable de faire tourner la toupie lentement pendant toute la durée du transport. Un clapet de fermeture est recommandé pour les transports dans des endroits à forte pente. Avant de décharger le béton, il faut faire tourner la toupie à vitesse élevée durant deux minutes environ.

Comme dans le cas du béton vibré, l'ouvrabilité du BAP peut se modifier pendant la durée du transport. La manière et l'ampleur de cette modification dépendent de nombreux facteurs comme les types d'adjuvants, le dosage en eau, la durée du transport et la température. Les producteurs de béton doivent en tenir compte de manière adaptée à leur expérience.

Dans une certaine mesure, il est possible d'en tenir compte en corrigeant pour la fabrication les exigences d'ouvrabilité spécifiées par le client et normalement souhaitées au moment du déchargement sur le chantier. En cas de retard imprévu et du raidissement du béton qui peut s'ensuivre, il est également possible dans le cas du BAP d'effectuer certaines corrections appropriées sur le chantier. Le temps de malaxage minimal recommandé en cas de rajout d'adjuvant dans le camion malaxeur doit être impérativement respecté, afin d'assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. Tout rajout d'eau est en revanche à proscrire **[63].**

I.3.8.3. Mise en œuvre des BAP sur chantier

D'une manière générale les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à leur facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.

Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants. Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage). Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages.

Il est important de limiter leur hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage. Le coffrage doit être rigide, étanche et résistant (éventuellement renforcé pour résister à la pression en pied de coffrage). Les produits démoulant doivent être parfaitement adaptés. La hauteur du coulage doit être compatible avec la tenue du coffrage à la poussée du béton. En usage courant (voile de 2.8 m de hauteur), la poussée lors du coulage ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages. Il convient d'équilibrer les pressions de part et d'autres des ouvertures. Pour des voiles de grande hauteur, quelques précautions particulières doivent être prises (il faut adapter par exemple la vitesse de bétonnage).

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau. Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfaçage pour les applications horizontales. Leurs performances à l'état frais autorisent leur pompage sur de longues distances et de nouvelles possibilités de mise en œuvre **[62].**

I.3.9. Conclusion

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usines de préfabrication, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution

- Des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
- Des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers et en usines) ;
- De l'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines.
- Les BAP présentent un grand intérêt pour la réalisation des produits préfabriqués en béton. Ils sont de plus en plus utilisés en usine pour réaliser de nombreux produits. Les compositions sont optimisées en fonction des applications visées, des contraintes techniques et économiques **[17].**

Ces nouveaux matériaux sont appréhendés dans le cadre d'une démarche globale prenant en compte les gains potentiels sur l'ensemble du cycle de vie des produits préfabriqués : matières premières utilisées, énergie consommée au cours du processus de fabrication, réduction des nuisances, diminution de la pénibilité des tâches, durabilité, esthétique, utilisation dans l'ouvrage et réutilisation en fin du cycle de vie… **[17].**

I.4. Renfort fibreux

Depuis toujours, les chercheurs visent l'amélioration des performances des matériaux de construction. Pour y parvenir, l'une des pratiques très utilisée dans ce but est le renforcement des matériaux par des fibres incluses en son sein **[64].**

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, béton autoplaçants et du béton projeté. Fabriquées à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose) ou autres, les fibres sont disponibles en diverses formes (rondes, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6 mm et 150 mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75mm Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage. Les principaux facteurs qui contrôlent la performance d'un matériau composite sont **[65]**

- Les propriétés physiques des fibres et de la matrice ;
- L'adhérence entre les fibres et la matrice.

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

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

En Algérie, les réserves forestières étant limitées, on se tourne plutôt vers l'utilisation de fibres de récupération et celles des plantes annuelles **[64].**

La fibre utilisée doit être avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice du béton et en particulier avec le ciment. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût acceptable compte tenu des performances qu'elle doit conférer à la matrice **[64].**

I.4.1. Généralités sur les fibres

L'idée d'utilisation des fibres dans les domaines pratiques est très ancienne. Dès l'antiquité, les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles spécialement celles d'origines végétales ou animales. Comme renforcement des matériaux traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans des plâtres, et spécialement par des fibres végétales. La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a augmenté les champs d'application des fibres dans plusieurs domaines **[64].**

Cependant, la première fibre utilisée dans le renforcement des ciments est la fibre d'amiante au début du 2^{eme} siècle. Le succès qui a marqué l'utilisation de l'amiante ciment est dû, premièrement à la grande demande du marché en matériaux à bas prix et durable, deuxièment à la disponibilité des deux matières premières principales que sont l'amiante et le ciment et enfin à l'existence d'un processus industriel de fabrication simple pour chaque produit **[64].**

Les applications de ciments renforcés de fibres de verre (CEF), ont commencé en Russie, puis Danemark par krenchel et aux USA par Romuald1 et enfin en Grande Bretagne par Nurse et Majunda **[64].** Le renforcement des ciments par les fibres de verre a commencé à partir des années 50.

Depuis 1966, les efforts ont été concentrés pour l'amélioration de la qualité des fibres notamment leur résistance aux alcalis.

Parallèlement, la technologie des fibres d'acier fut développée. Des recherches se poursuivent pour adopter des matériaux à toutes performances.

Cependant, si les fibres de verre et les fibres d'acier donnent de meilleurs résultats dans le renforcement du ciment, il faut noter que du point de vue coût elles sont très chères comparées à d'autres types de fibres telles que les fibres végétales.

Les fibres de toute nature sont très employées dans différents ouvrages dans le but d'augmenter leurs performances mécaniques et physiques.

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte aux années ou l'on fabriquait des briques d'argile renforcées par de la paille ou des roseaux. Les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans les dalles, la production des tuiles et les dallages de parking ainsi que dans le renforcement du plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec le plâtre renforcé de fibres végétales **[66].**

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement de 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, particulièrement, pour les pays en voie de développement, qui possèdent des fibres naturelles en grande quantité qui sont souvent laissées sans valorisation.

En outre, la production de nouveaux matériaux composites à base de fibres végétales est l'un des domaines le plus récemment exploité. Plusieurs chercheurs révèlent que le renforcement d'une matrice à base de résine ou de plastique par des fibres végétales donne de bon résultats tant sur le plan économique que sur le plan mécanique **[67].**

Les résultats des travaux de **[68]** montrent que les matériaux composites **à** base de fibres végétales et plastiques à matrice de résine présentent des propriétés intéressantes.

D'autres travaux de **[69]** montrent la possibilité d'améliorer les propriétés des produits polymères (plastique) par les fibres naturelles.

L'avenir du développement des bétons de fibres sera peut être attribut aux fibres végétales. Particulièrement pour les pays en développement qui possèdent des fibres naturelles en grande quantité qui ne sont pas souvent valorisées **[64].**

Comme notre étude s'intéresse à l'utilisation des fibres végétales palmier dattier dans le mortier autoplaçant, nous exposerons ultérieurement en détail ce végétal et ses propriétés.

I.4.2. Définition des fibres

Le terme « Fibre » se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu [**65].**

I.4.3. Critère de choix du type de fibres

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

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) **[70].**

Leur géométrie est très variable (**Figure I.25**). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [**71**] et par frottement à l'interface avec la matrice. On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

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

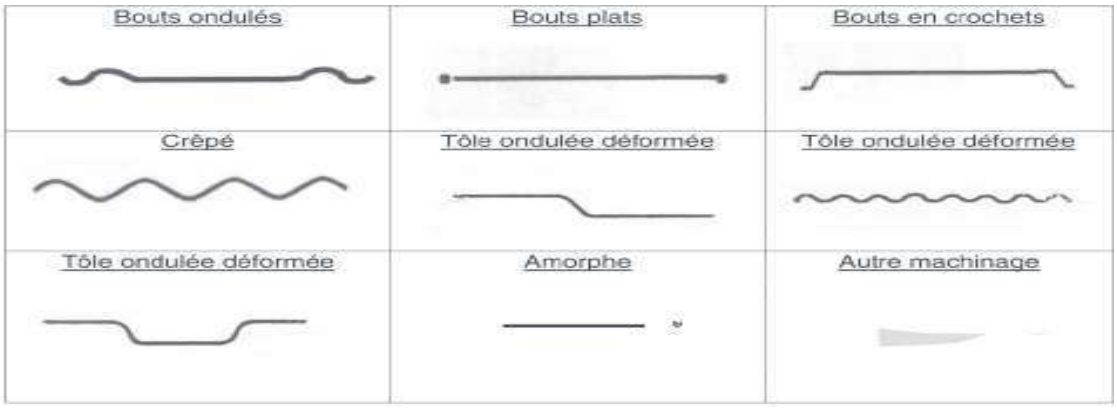


Figure I.25 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques **[72]**

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) **[73].** Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

I.4.4. Avantages et Inconvénients des fibres

I.4.4.1. Avantage des fibres

Le béton subit des fissurations dont les causes sont diverses : retrait, réactions chimiques, contraintes mécaniques ou environnementales,….pour lutter contre ces fissurations, on a tendance à augmenter la section des aciers d'armatures. L'adhérence entre l'acier et le béton empêche alors les fissures de se propager car l'acier ne souffre pas du phénomène de retrait.

La présence de fibres dans le béton modifie son comportement interne .en effet, elles ont l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme .Lorsqu'une fissure apparaît, les fibres empêchent la fissure de se propager par un effet de couture. Chaque fibre qui est, alors, soumise à un effort de traction entre les deux bords de la fissure .cet effort de traction est, ensuite, reporté sur les parois du béton en adhérence avec la fibre .Ce phénomène s'effectue dès l'amorçage de la fissure, augmentant ainsi la résistance à la fissuration du béton **[80].**

Ces fibres améliorent, également, la résistance à la flexion des bétons .cependant cette amélioration est fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques des fibres.

L'un des principaux avantages des fibres synthétiques et végétales par rapport aux fibres métalliques ou aux armatures réside dans leur faible densité à l'origine de l'allégement des bétons. De surcroît, elles permettent d'avoir une bonne mis en œuvre du fait de la rapidité de mélange et de la facilité du malaxage. Elles ne sont pas sujettes aux problèmes de corrosion contrairement aux fibres métalliques .Elle permettent ainsi une meilleure durabilité du béton tout en ayant des propriétés mécaniques comparables aux bétons armé ou renforcés par des fibres métalliques courtes **[80].**

I.4.4.2. Les inconvénients des fibres

Le dosage et le coût de fibres varient d'un type de fibre à l'autre, c'est pourquoi, il n'est pas possible de dire qu'en général, il est avantageux ou désavantageux d'utiliser des fibres plutôt que des armatures ou bien même que d'autres fibres **[80].**

I.4.5. Les caractéristiques et les propriétés des fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques **[17]**

Tableau I.3 : Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres **[17]**

	Masse volumique (en g/cm^3)	Diamètre moyen (en µm)	Résistance à la traction (en N/mm^2)	Module d'élasticité (en Gpa)	Allongement à la rupture (en %)
Fibres métaliques	7.85	50-1000	1000-2500	150-200	3-4
Fibres de verre	2.6	9-15	2000-3000	80	2-3.5
Fibres polypropylène	0.9	> 4	500-750	5-10	10-20

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

- être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
- se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent

- être déformables sans être fragiles ;
- être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ;
- offrir une bonne capacité de déformation ;
- posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire;
- présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

I.4.6. Le rôle des fibres

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures **[17].**

Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives.

Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- La cohésion du béton frais ;
- La déformabilité avant rupture;
- La résistance à la traction par flexion ;
- La ductilité et la résistance post fissuration ;
- La résistance aux chocs ;
- La résistance à la fatigue ;
- La résistance à l'usure;
- La résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
- La tenue au feu.

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres, permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :

- la maîtrise de la fissuration ;
- une facilité et rapidité de mise en œuvre;
- un renforcement multidirectionnel et homogène ;
- un remplacement partiel ou total des armatures passives.

L'incorporation de fibres dans le béton doit faire l'objet d'une étude de formulation et d'une vérification de la compatibilité avec les autres constituants. Les bétons fibrés nécessitent souvent un dosage en superplastifiant plus élevé pour maintenir l'ouvrabilité du béton. Des essais peuvent être nécessaires pour déterminer, la nature, la taille et le dosage des fibres en fonction des caractéristiques et des performances requises **[17].**

I.4.7. Différents types de fibres utilisées dans le béton

On distingue trois grandes familles de fibres **[17].**

- Les fibres métalliques
  - acier ;
  - inox ;
  - fonte (amorphe).
- Les fibres organiques
  - polypropylène ;
  - polyamide ;

- ☞ acrylique.
- ☞ mélange polypropylène/polyéthylène ;
- ☞ aramide ;
- ☞ carbone.

➢ Les fibres minérales

- ☞ verre;
- ☞ basalte.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m3 de béton.

I.4.7.1. Les fibres métalliques

La fibre métallique est parmi les fibres les plus commercialisées vendues, et bien sûr disponibles sous des formes et dimensions les plus variées (**Figure I.26)**. Ces fibres présentent un module d'élasticité de 210 (GPa), une masse volumique de 7.85t/m³ et une résistance à la traction de 1 à 2 (GPa). Elles existent sous diverses formes et longueurs. L'élancement est souvent compris entre 30 et 150 pour une longueur allant de 6.4 à 76 mm.

Le pourcentage volumique de fibres métalliques dans le béton varie de 0.3 à 3%. L'optimisation du pourcentage de fibres, de la longueur et de la forme a donné lieu à de nombreuses études **[74].**

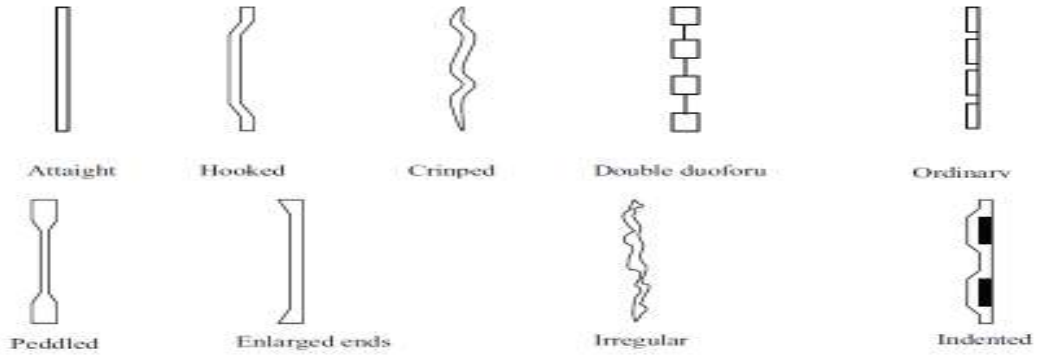


Figure I.26.a : Forme de la fibre d'acier

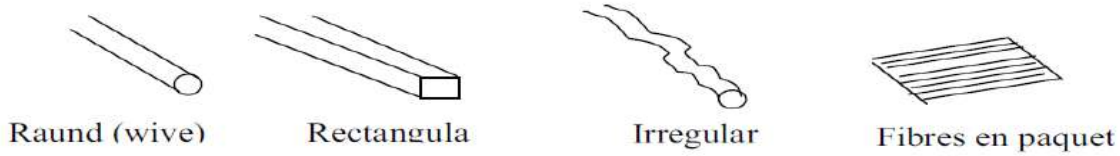


Figure I.26.b : Section transversale de la section d'acier

Figure I.26 : Les fibres métalliques, (formes et dimensions variables) **[74]**

Pour des usages particuliers, certaines fibres utilisées sont inoxydables ou traitées contre la corrosion. Leur principal avantage est une amélioration de la résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité donc une bonne tenue aux chocs ainsi qu'à l'usure **[75].**

De ces avantages découlent les principaux domaines d'utilisation : en particulier les dallages industriels, les ouvrages coulés en place tels que les pieux, piste d'aéroport, revêtement de tunnel, soutènement; ces deux dernières applications font appel à la technique des bétons projetés, les voussoirs de tunnel préfabriqués sur site, les produits en béton manufacturé tels que pannes, panneaux de façade, pré cadre de baies **[76].**

La recherche de l'adhérence et d'une bonne compatibilité avec le béton à donné naissance à une grande variété de fibres métalliques susceptibles, par leurs formes ou leurs états de surfaces de mieux s'ancrer dans le béton.

A ce propos nous citons les fibres métalliques les plus utilisées.



Figure I.27: Exemples de fibres métalliques **[17]**

Si l'on applique un effet de traction au béton fibré, il se comporte avant rupture selon trois phases :

- les fibres et le béton agissent ensemble dans une phase élastique ;
- des microfissures se produisent, l'effort de traction est repris par les fibres qui limitent la propagation de la fissuration ;
- les fissures se développent, les fibres perdent leur adhérence avec la matrice.

Toute fibre d'acier qui traverse une fissure crée en quelque sorte un « pont » entre les deux bords de la fissure. Ce pont va permettre le transfert d'une partie de la contrainte ayant entraîné l'ouverture de la fissure. C'est ainsi qu'une fibre s'oppose à l'élargissement de la fissure, jouant véritablement le rôle d'une couture et augmente la résistance du béton après fissuration **[17].**

Les fibres métalliques permettent donc de "coudre" les microfissures et évitent leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures. Elles apportent des caractéristiques mécaniques post-fissurations au béton **[17].**

Du fait de leurs propriétés, les fibres métalliques trouvent un vaste domaine d'applications, si l'on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour optimiser le dimensionnement des pièces **[17].**

I.4.7.2. Fibres minérales

A. Les fibres de carbone

Les fibres de carbone forment une grande variété (**figure I.28**), elles sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur (fibres orientées et réticulées). Suivant l'origine de ce dernier, on distingue les fibres de carbone élaborées à partir de :

A.1. Fibres acrylique

Connu sous divers noms commerciaux (crylor, courtelle, dralon,…).

A.2. Précurseur brai

Résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille **[77].**

Leurs inconvénients majeurs résident dans leurs fragilités et leurs coûts élevés. Toutefois, les fibres de carbone noyées dans la matrice cimentaires sont inertes et confèrent au composite d'excellentes propriétés (facilité de finition, bonne résistance thermique et mécanique, …), de

plus l'un des grands avantages des fibres de carbone est leur faible dimension. Qui offre la possibilité de fabriquer des composites ayant une haute teneur en fibres **[76].**



Figure I.28 : Fibres de carbones

Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues **[78]**

- Grande résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale ;
- Grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
- Faible masse volumique ;
- Grande résistance à l'usure ;
- Absorption des vibrations ;
- Grande stabilité dimensionnelle ;
- Grande stabilité thermique (les fibres de carbone sont pratiquement incombustibles) ;
- Bonnes conductivités thermique.

B. Les fibres de verre

Les fibres de verres sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées à 1250°C. A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices. Ils sont produits à partir d'un verre filable appelé verre textile composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performance/prix qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites **[77].**

Mais il faut signaler que l'action corrosive des alcalins contenue dans le ciment sur les fibres de verres (problème de durabilité), malheureusement influe directement est d'une manière rapide sur les caractéristiques mécaniques des mortiers de fibres de verres, et provoque des microfissurations dues au phénomène de fluage **[78].**

A cet effet, les fibres de verre pour pouvoir être utilisées dans le béton doivent subir soit un traitement par ensimage, soit être protégées au moment de leur emploi par ajout dans la gâchée de polymères, soit enfin avoir été fabriquées avec un verre de zirconium cette dernière solution étant la plus pratique **[78].**

Dans ce même contexte des recherches ont été entreprises pour empêcher l'attaque chimique du verre, en fabricant des fibres de verre E revêtues par imprégnation d'une résine thermoplastique; ainsi un verre résistant aux alcalins à été développé en Angleterre par la B.R.E (Building Research Establishment).

Ce verre se différencie du verre à vitre sodo-calcique et du verre E par son enrichissement en Zircone. Les études effectives ont montré que ce verre était très résistant aux alcalins et qu'il convenait parfaitement pour renforcer le béton **[79].**

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faible diamètre (quelque dizaine de microns)(**Figure I.29**), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques **[77].**

Tableau I .5 : Caractéristiques physiques et mécaniques de fibres de verres **[79]**

Fibre	**Fibre Diamètre en µm**	**Densité**	**Allongement de rupture en%**	**Module d'élasticité en (GPA)**	**Résistance en tract (GPA)**
verre	5-500	2.4	2-3.5	80	2-3

En préfabrication, les domaines d'application sont très vastes. Les fibres de verre permettent la réalisation d'éléments de faible épaisseur (éléments architectoniques, éléments de bardage, panneaux de façade, etc.), de mobilier urbain et de produits d'assainissement **[17].**

- Panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé.
- Éléments de bardage et éléments décoratifs.
- Éléments divers : coffret, coffrages, habillages.
- Produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux.

Elles présentent une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °C). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confèrent aux bétons de fibres de verre une bonne résistance à des températures élevées.

Sur chantier, les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches, ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique **[17].**

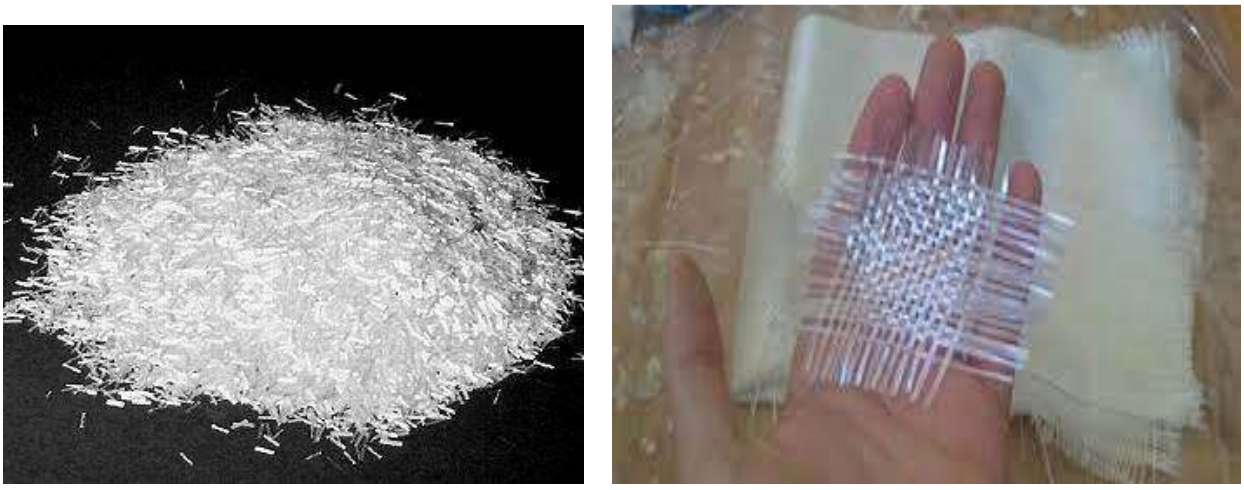


Figure I.29 : Fibres de verres

I.4.7.3. Les fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines, découvert en 1954. Ils sont obtenus suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre les propriétés mécaniques élevées **[78].**

Ces fibres se présentent le plus souvent en faisceaux qui une fois introduits dans le matériau se séparent et se répartissent dans la masse du béton. Leurs longueurs les plus courantes varient de 10 à 15 mm pour des diamètres compris entre 15 et 250 microns, leurs masse volumique est d'environ 0.9 kg/dm³ et leur résistance à la traction est sensiblement le quart de celle des fibres métallique **[79].**

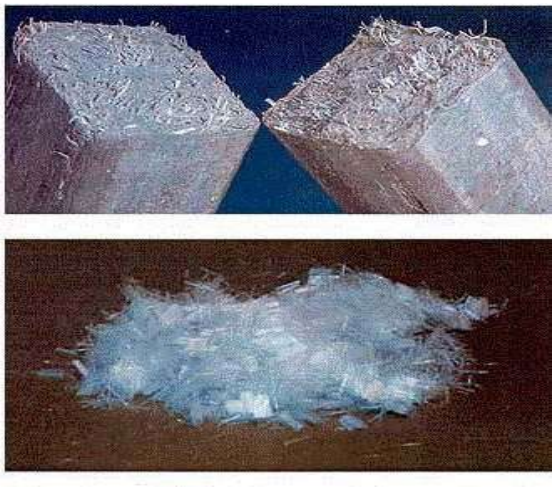


Figure I.30: Fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec des fibres de polypropylène ne soulève pas de difficulté particulière. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précautions spécifiques lors du malaxage. L'optimisation de l'adjuvantation permet de réaliser des bétons dont l'ouvrabilité est conservée. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs **[78].**

De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène:

- dallages et aménagements urbains ;
- produits préfabriqués (parements) ;
- mortiers projetés ;
- enduits ;
- sculptures.

I.4.8. Les principaux domaines d'application

Les fibres sont utilisées dans beaucoup de domaines, en particulier dans le textile et l'industrie automobile. Leur introduction dans le bâtiment et les travaux publics est récente comparée aux autres secteurs industriels .le tableau regroupe la principale application des bétons fibrés dans le secteur du BTP **[17].**

Tableau I.6 : Principales applications **[17]**

Type de fibres	Dosage courant	Domaine d'applications privilégiées	Exemples d'application
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m3	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	– Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression – Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux – Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement – Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m3	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	– Dallage –Voussoirs de tunnels – Revêtement d'ouvrages souterrains – Mortiers projetés – Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	–Parements architectoniques – Panneaux de façade – Éléments décoratifs

I.4.9. Conclusion

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 de santé que présente les fibres d'amiante et 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.

I.5. Les bétons de fibres

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. **[70]** La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la microfissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie **[73].** Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse **[70].**

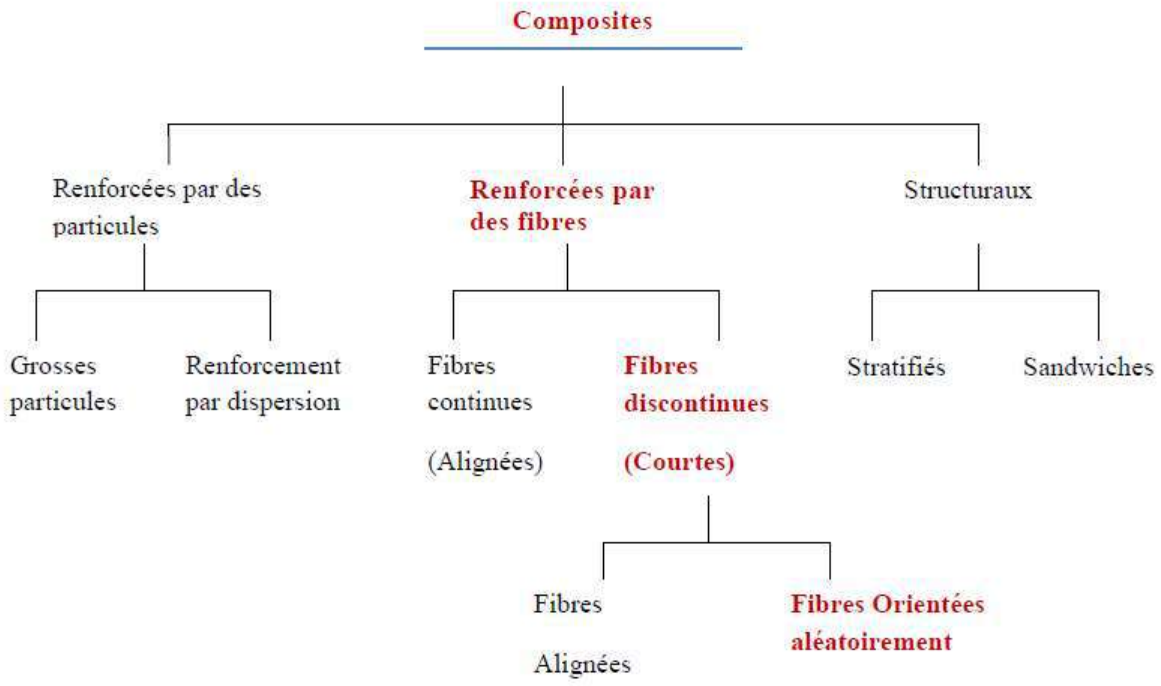


Figure I.31 : Classification schématique des différents types de composites **[81]**

I.5.1. Définition de béton de fibres

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

Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées. Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques **[17].**



Figure I.32 : béton de fibre

I.5.2. Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique. Aspect technique. L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé **[72].**

Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en postfissuration (résistance résiduelle);

- Une résistance aux impacts élevée;
- Une résistance à la fatigue élevée;
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.
- Aspect économique. Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :
- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction;
- Une optimisation du dimensionnement.

I.5.3. Mise en œuvre du béton renforcé de fibres

Lors de la mise en œuvre du béton de fibres, le dosage en fibres ne peut pas dépasser certaines limites car au delà, le gâchage et la mise en œuvre deviennent impossibles. Compte tenu des rôles opposés dévolus aux paramètres fondamentaux des fibres (dosage en volume, forme et rapport longueur sur le diamètre) sur l'ouvrabilité et la mise en œuvre, et sur l'efficacité mécanique après durcissement, on doit se limiter à une gamme de pourcentages qui ne donne qu'une efficacité mécanique réduite mais qui permet une mise en œuvre acceptable **[82].**

II.5.3.1. Composition du béton de fibres

La composition du béton de fibres est différente de celle du béton armé. L'ouvrabilité et l'homogénéité du béton de fibres dépendent de trois facteurs principaux qui sont la géométrie des fibres, la granulométrie de la matrice et le volume de fibres dans le composite. Pour avoir un renforcement efficace de la matrice, les fibres doivent être suffisamment longues pour s'opposer à l'ouverture des fissures inter granulaires, cette longueur doit représenter trois fois la dimension du plus gros granulat **[83].** Aussi, pour coudre efficacement les deux lèvres des fissures, il faut que les fibres soient munies d'un système d'accrochage qui leur assure un ancrage solide dans la matrice. Cependant, il faut noter que l'augmentation de la longueur des fibres et la présence de systèmes d'ancrage spécifiques diminuent l'ouvrabilité du béton. Les difficultés liées à l'élancement peuvent, néanmoins être surmontées par l'utilisation de fibres accolées. Les fibres d'élancement supérieur ou égal à 100, accolées en plaquettes de 25 à 50, peuvent être introduites sans danger de formation de pelotes **[84].**

La granulométrie du béton est étroitement liée à la dimension des fibres. Les dimensions des granulats doivent être telles qu'un nombre réduit de fibres suffise à les encadrer (**Figure I.33**). Pour que les granulats soient bien encadrés par les fibres il est nécessaire d'avoir une matrice riche en éléments fins. Une composition granulaire appropriée s'avère donc nécessaire pour le

béton armé de fibres afin d'obtenir une distribution uniforme des fibres dans le béton et parer à la formation des pelotes de fibres.

La granulométrie influe beaucoup sur la maniabilité du béton, la présence de gros granulats crée des frictions entre les particules ce qui a tendance à réduire l'ouvrabilité. De plus, les fibres incorporées au mélange interférent avec les gros granulats et se trouvent de ce fait limitées dans leurs possibilités de mouvement ce qui affecte aussi la maniabilité. Les fibres s'accommodent mieux de bétons relativement fins dont le diamètre maximum des grains est de l'ordre du quart de la longueur de la fibre, les bétons de sable se prêtent particulièrement bien à l'inclusion de fibres.

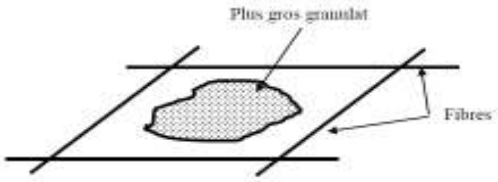


Figure I.33: Encadrement d'un granulat **[84]**

Concernant la teneur en fibres, il a été montré **[85]** que la teneur maximale dans la matrice est limitée par le pourcentage de gros granulats car les fibres doivent être bien enrobées. Une forte teneur en fibre entraine une diminution rapide de l'ouvrabilité du béton du fait que l'incorporation des fibres se traduit par une augmentation de la surface spécifique dans le mélange. Cette augmentation de surface tend, par absorption d'eau, à sécher le mélange, ce qui engendre une perte de compacité et d'ouvrabilité (**Figure I.34**). Pour augmenter l'ouvrabilité du béton de fibres on ajoute en général des plastifiants dans le mélange. La quantité de plastifiant à ajouter dépend de son efficacité. Il faut, dans ce cas là, un ajustement de la composition des granulats pour que l'adjuvant atteigne son maximum d'efficacité. La teneur en fibre est fixée par une relation empirique dite « limite de faisabilité » :

V_f. L/D < 3 **(Equation I.5)**

Avec :

- $V_f = V_f$ % .100 : fraction volumique des fibres

- L/D : élancement des fibres.

Le dosage limite couramment utilisé pour les bétons de fibres métalliques est de l'ordre de 2% **[86].**

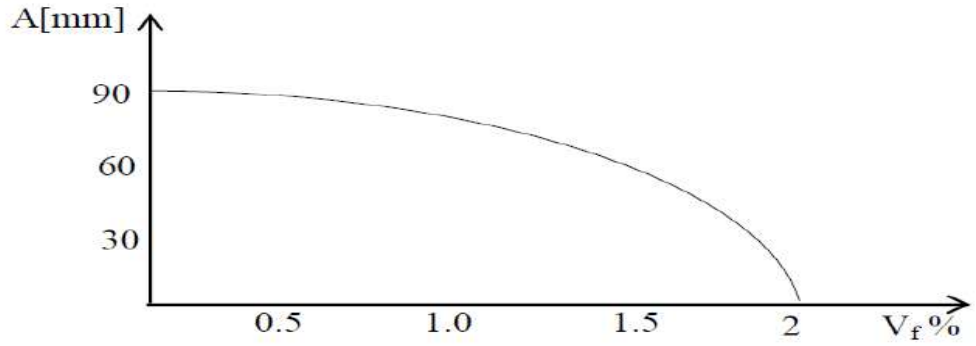


Figure I.34 : Effets des fibres sur l'affaissement du béton au cône d'Abrams **[86]**

I.5.3.2. Formulation du béton de fibres

Les méthodes de composition des bétons renforcés par des fibres métalliques **[86], [87]** pour la plupart empiriques, sont basées essentiellement sur un grand nombre d'études expérimentales. Elles aboutissent à des recommandations qui ne sont pas adaptées à toutes les utilisations que l'on fait du béton de fibres et ne permettent pas de tirer le meilleur parti de ce composite.

Suivant l'application industrielle envisagée, la composition du béton renforcé de fibres métalliques doit être à chaque fois spécifique et conduire à un composite optimisé vis-à-vis de l'objectif visé. Ainsi, suivant que l'on désire obtenir un béton de fibres métalliques très maniable, très résistant ou ayant une influence sur la ductilité des structures, la composition du matériau composite sera complètement différente. Pour mieux optimiser la composition des bétons de fibres métalliques, le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) propose une méthode expérimentale basée sur la méthode de BARON LESAGE, utilisée pour les bétons courants. Cette méthode est basée sur deux hypothèses:

- pour un dosage en eau et ciment fixé au départ (E/C fixé), le béton le plus maniable est le plus compact et son squelette minéral est optimal.
- le dosage optimal en granulats ne dépend pas de la nature et du volume de pâte de ciment (Eau+ciment).
- Pour appliquer cette méthode au béton de fibres métalliques on introduit une troisième hypothèse : l'ajout de fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses **[88].**

La méthode de Baron-Lesage consiste à:

- Fixer au départ, le rapport eau sur ciment(E/C) ainsi que le pourcentage de fibres à incorporer, faire varier le rapport S/G (sable sur granulats) et déterminer pour chaque rapport la maniabilité du béton de fibres,
- Tracer la courbe reliant la maniabilité et le rapport S/G et déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est la plus grande.

L'application de la méthode de BARON LESAGE pour la composition du béton de fibres métalliques conduit à une composition totalement différente de celle du béton courant. La composition obtenue est riche en pate de ciment, ce qui favorise l'adhérence des fibres à la matrice. Lors de l'élaboration du béton de fibres métalliques il convient :

- de bien choisir la méthode de mesure de l'ouvrabilité du béton car toutes les méthodes ne conviennent pas au béton de fibres. En effet, le cône d'Abrams qui peut convenir pour les faibles dosages en fibres (30 Kg / m3) et les maniabilités élevées ne semble pas s'adapter aux bétons fermes et aux dosages en fibres plus élevés. Les méthodes de mesure faisant appel à la vibration (maniabilimètre LCL, flow test) sont plus indiquées.
- de choisir judicieusement le type et le pourcentage de fibres à incorporer en relation avec l'application industrielle visée.
- d'éviter l'utilisation de l'aiguille vibrante du fait de l'orientation préférentielle des fibres et de l'effet de cheminée. Il est préférable d'utiliser les vibreurs de coffrage et les règles vibrantes.
- de porter une grande attention à la méthode de malaxage, donc à la séquence d'introduction des différents matériaux, de façon à assurer une distribution uniforme des fibres dans le mélange frais.

I.5.4. Propriétés physiques et mécaniques des bétons de fibres

Le béton présente toujours des microfissures dues à différentes causes telles que le retrait, les contraintes thermiques, les contraintes appliquées au jeune âge, …etc. Le rôle des fibres est de mieux contrôler cette fissuration. En service, lorsqu'une fissure apparait dans le béton, une partie de l'effort est reprise par les fibres pontant les fissures. Ces fibres sollicitées à la traction et au cisaillement absorbent une partie de l'énergie nécessaire à la propagation des fissures et évitent une propagation incontrôlée de la fissuration du béton. Il faudrait alors davantage d'énergie, donc d'effort, pour propager cette fissuration.

Le rôle principal des fibres est de modifier la répartition des fissures et de transférer les charges d'une lèvre à l'autre des fissures, en les pontant, et par conséquence de conférer une

certaine ductilité au matériau. Les fibres améliorent aussi la résistance à la fatigue et aux chocs grâce à la résistance résiduelle développée après la fissuration du matériau **[89].**

I.5.4.1. Résistance à la compression

Plusieurs études théoriques et expérimentales ont montré que la présence des fibres dans le béton influe peu sur sa résistance à la compression. L'ajout des fibres métalliques augmente la résistance à la compression du composite d'environ 20% ZHAN **[87].** Selon ROSSI **[88]** la résistance ultime et le module d'élasticité du béton armé de fibres diffèrent peu de la résistance ultime et du module d'élasticité de la matrice de béton. Néanmoins, la présence des fibres dans le béton augmente la déformation à la rupture et confère ainsi une plus grande ductilité au composite.

I.5.4.2. Résistance à la traction

Comme pour la compression, les fibres apportent une légère augmentation de la résistance à la traction du béton de fibres (un accroissement de 16% selon ZHAN **[87])** et une certaine ductilité du comportement post- rupture du composite **[88].** La présence des fibres dans le béton joue un rôle important dans le comportement en traction du composite. Les fibres interviennent à deux échelles:

- A l'échelle du matériau en "cousant" les microfissures, elles retardent la localisation de la fissuration. Cette action peut provoquer une augmentation de la résistance à la traction, cette augmentation dépend de la teneur en fibres et de leur orientation dans la masse de béton.
- A l'échelle de la structure, en retenant les deux blocs de béton fissuré grâce à leur ancrage des deux côtés de la fissure. Les fibres permettent d'atténuer la fragilité du béton et lui procurent ainsi une plus grande ductilité.

I.5.4.3. Résistance à la traction par flexion

Le comportement du béton en flexion est conditionné par la fissuration de la zone tendue. Pour cela, la présence des fibres peut jouer un rôle de stabilisateur après rupture de la matrice de béton. En effet, alors que le béton sans fibres se désagrège rapidement après fissuration, les bétons de fibres d'acier continuent à reprendre des efforts même après que la charge maximale soit atteinte.

De nombreuses études ont montré une nette amélioration de la résistance à la traction par flexion. Pour SWAMY et al **[90]** la résistance à la traction par flexion des bétons de fibres est

2 à 6 fois plus grande que celle des bétons sans fibres, alors que pour ZHAN **[87]** elle n'augmente que de 40 à 50 %. MAMILLAN et al **[91]** ont constaté que seules les fibres à crochets avec un pourcentage de 1% peuvent augmenter de façon significative la résistance ultime à la traction par flexion.

I.5.4.4. Résistance aux chocs

Le caractère ductile des bétons armés de fibres leur procure une amélioration de leur résistance aux chocs. Comme les chocs génèrent des contraintes de traction et les fibres améliorent la résistance à la traction des matériaux, leur présence augmente donc la résistance aux chocs du béton de fibres. H. KRENCHEL **[92]** ont mis en évidence l'augmentation de la résistance aux chocs avec l'augmentation de la teneur en fibres.

I.5.4.5. Résistance à la fatigue

La présence des fibres augmente la résistance à la fatigue et améliore le comportement du béton sous sollicitations cycliques. Ceci a été montré par DEHOUSSE et al **[93]** et RAMAKRISHAN et OBERLING **[94]** qui ont mis en évidence, par des essais de fatigue en flexion, que les fibres augmentent les caractéristiques de fatigue (résistance et nombre de cycle à rupture) de façon considérable.

I.5.4.6. Résistance à l'abrasion

D'après T. CUYKENS et al **[95],** les fibres en acier n'ont pas beaucoup d'influence dans le cas où il n'ya qu'une érosion superficielle seulement. Quand l'érosion s'accompagne de sollicitations dues aux chocs et à l'écaillage du béton, les fibres peuvent augmenter fortement la durée de vie du béton en freinant la propagation des microfissures.

I.5.4.7. Résistance au cisaillement

Selon EL HACHEM **[96]** et VALADE **[97],** la présence de fibres dans le béton augmente sa résistance au cisaillement. Ils ont montré aussi que la résistance au cisaillement augmente avec l'accroissement, jusqu'à 1%, de la teneur en fibres. NARAYANAN et al **[98]** lors d'essais sur des poutres armées traditionnellement (2 à 3% d'armatures), renforcées par des fibres métalliques, ont noté que:

- la résistance au cisaillement des bétons de fibres dépend de la géométrie, de la forme et du pourcentage de fibres. Ces paramètres peuvent être caractérisés par un facteur des fibres 'F' défini par la relation suivante :

$$F = V_F . D_F . l / d \qquad \textbf{(I.5)}$$

Avec :

V_F: Pourcentage des fibres ;

D_F : Facteur de l'efficacité de l'adhérence fibre matrice ;

l / d: élancement de la fibre.

- l'augmentation du facteur F permet d'améliorer la ductilité du comportement du béton au cisaillement,
- l'augmentation du pourcentage de fibres peut changer le mode de rupture au cisaillement en un mode de rupture à la flexion. La rupture par cisaillement peut intervenir aussi dans le cas d'une poutre soumise à la flexion si le rapport a/d est compris entre 3 et 7. (a : distance entre le point d'application de la charge et l'appui, d : hauteur efficace de la poutre).

I.5.4.8. Comportement vis-à-vis du retrait

La présence des fibres permet de freiner les mouvements du squelette dû à l'évaporation de l'eau ou à l'évolution de la microporosité. Le retrait du béton de fibres est alors moins important que celui du même béton sans fibres. Les essais de retrait réalisés par EL HACHEM **[96],** SWAMY et BAHIA **[85]** et VALADE **[97]** sur un béton renforcé par des fibres montrent que la présence de ces dernières entraine la diminution du retrait. De plus, la réduction du retrait augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres.

En ce qui concerne le retrait gêné, EL HACHEM **[96]** remarque que la présence des fibres permet d'augmenter de 28% la contrainte de rupture due au retrait par rapport au béton témoin (sans fibres).

I.5.4.9. Perméabilité et résistance à la corrosion du béton de fibres

La perméabilité est la propriété hydrodynamique d'un matériau poreux, elle est liée directement à la protection des fibres noyées dans le béton et influence la tenue à long terme des bétons de fibres.

Concernant les fibres en acier dans le béton, des examens faits sur le béton de fibres d'acier, dans divers milieux favorisant la corrosion, ont montré que ce dernier présente un bon comportement contre les risques de corrosion, les fibres superficielles rouillent rapidement, mais la discontinuité du renforcement empêche la propagation de la corrosion. Si des éventuelles taches de rouille sont gênantes, on peut imprégner la surface du béton avec des matières plastiques, ou la recouvrir d'une couche appropriée (béton projeté par exemple).

L'expérience de NEMEGEER **[99],** basée sur l'observation de l'évolution de la résistance du béton de fibres et du même béton sans fibres dans une solution agressive est un bon exemple représentatif de ces résultats.

I.5.4.10. Résistance aux chocs thermiques

D'après T. CUYKENS **[95],** l'adjonction des fibres d'acier étiré à des bétons réfractaires soumis à des températures élevées et surtout à des chocs thermiques peut prolonger sensiblement la durée de vie de ces bétons. On utilise actuellement pour ces applications des fibres en acier inoxydable, à des pourcentages allant de 0.5 à 1.5 %. Ces fibres ne perdent leurs propriétés qu'à des températures très élevées.

I.5.5. Domaines d'utilisation du béton renforcé de fibres

Depuis que le béton de fibres a été conçu, de nombreux travaux ont montré que l'insertion de fibres d'acier dans une matrice de béton permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques, comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, du composite résultant. Cependant, ce type de béton n'est pas considéré comme un substitut aux bétons traditionnels, mais comme un matériau nouveau qui devient intéressant pour la conception de structures performantes. Avec de faibles dosages en fibres d'acier (1% en volume) les bétons de fibres obtenus présentent des performances intéressantes (bonne maniabilité, bonnes caractéristiques mécaniques).De plus, leur coût est relativement bas au regard de certaines applications spécifiques.

Dans le **Tableau 1.7** ci-dessous, on indique quelques domaines d'utilisation du béton de fibres.

Tableau I.7: Domaines d'utilisation du béton de fibres

Principales applications	**Intérêt de l'adjonction de fibres dans le béton**
Canalisation et coques minces	-Amélioration de la résistance aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Panneaux de revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement
Dallages de faible épaisseur, chaussées en béton, dallages manufacturés et tout élément structural soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts	- Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Elément structural soumis à la compression (poteau, pieu, …. etc.)	- Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture catastrophique
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains	- Evite le travail de fixation du grillage ordinairement employé. - Diminution de coût de réparation de stabilisation des parois et des talus

I.5.6. Conclusion

Les bétons ou mortiers de fibres possèdent plusieurs avantages tels qu'une bonne résistance à la fissuration et à la traction, ainsi qu'une bonne ductilité. Par ailleurs, la résistance à la compression est généralement inférieure à celle du béton ou mortier classique, mais elle peut être légèrement améliorée par une bonne orientation des fibres dans la matrice.

Il existe plusieurs lois qui modélisent le comportement de bétons de fibres d'aciers sous différents types de sollicitations, traction, compression ou flexion. Ce n'est pas le cas pour les fibres végétales d'où la nécessité de développer des lois qui interprètent le comportement des fibres végétales.

En outre, le comportement du matériau composite est différent de celui de bétons classiques et nécessite une amélioration des méthodes d'essais traditionnelles, ainsi que le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

I.6. Bétons autoplaçants fibrés

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

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

Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs ont montré qu'il peut être une solution appropriée pour les applications sur poutres en I en béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration **[100]**.

L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. D'après Groth P **[101]**, cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement.

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

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

I.6.1. Influence des fibres sur les propriétés a l'état frais

Grunewald **[102]** a réalisé un programme (2001, 2003, 2004, 2005) dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat.

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

A. Effet sur l'étalement

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans la composition de référence. On remarque aussi sur la (**Figure I.35.a**) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique, ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions.

En outre, pour certaines compositions voir (**Figure I.35.b**) avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La (**Figure I.35.c**) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu.

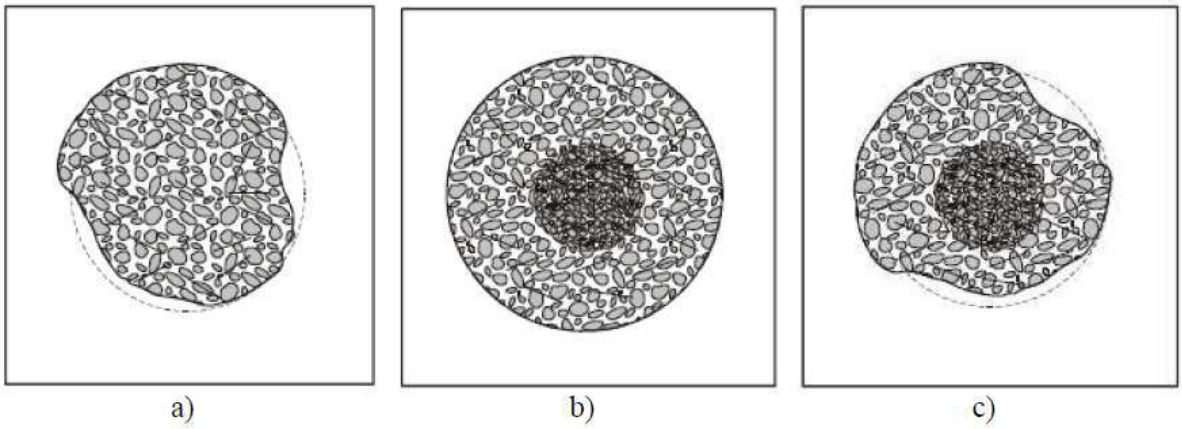


Figure I.35: Effet des fibres sur l'étalement des BAP **[108]**

Sachant que l'élancement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, Grünewald et Walraven **[102]** se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres Vf et l'élancement. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

B. Essai de V-Funnel

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

On note une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulat par rapport aux

dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. Les temps de passage à travers l'entonnoir à t =1h sont nettement plus élevés qu'à t =0h.

C. Essai J-RING

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

L'espacement exigé des barres pour le non blocage augmente avec le dosage en fibre. **[103]** ont réalisé une étude sur le comportement à l'état frais des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques et ont conclu que l'écoulement est obstrué par les barres, ce qui crée une différence de niveau entre le béton restant à l'intérieur de l'anneau et celui passé à travers. L'élancement de la fibre, la teneur des granulats (fins ou gros) et les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment affectent également ce comportement.

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

Grünewald et Walraven **[102]** ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement.

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

I.6.2. Orientation et distribution des fibres

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. **[104]** a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats.

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

Groth et Nemegeer **[105]** a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion.

I.6.3. Utilisation des BAP fibres dans les structures

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

A. Palplanches

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois (maintenant en acier). Il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait dans la terre pour former un encaissement dans l'eau. Spanbeton ; un producteur hollandais d'éléments en béton préfabriqués propose aujourd'hui des palplanches en béton. Ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier. Comparés à ceux en acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure, (**Figure I.36**).



Figure I.36 : Deux types de palplanche

B. Voussoirs

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

Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu (**Figure I.37**).



Figure I.37 : Exemple d'un voussoir

I .6.4. Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés

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

A. Comportement à la flexion

D'après Groth **[101]** une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

Alcantara **[106,107]**, Granju et al **[108]** ont étudié le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibraflex (FM) et synthétiques de type polypropylène (FS).

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

Les résultats obtenus sont détaillés ci-après.

- Les fibres métalliques « FM » qui sont réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.
- Les fibres synthétiques « FS » n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, elles confèrent tout de même au système une résistance résiduelle post-pic maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges.

- L'association des deux types de fibres peut donc constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.
- Les BAP semblent conférer une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques. Les (**figures I.38.a** et **I.38.b)** illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en termes de courbe force-flèche.

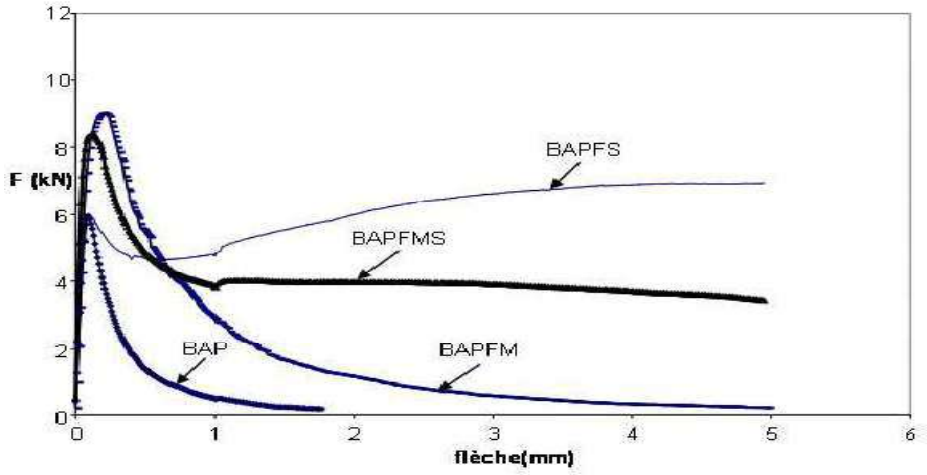


Figure I.38.a : Détail jusqu'à une flèche de 6m

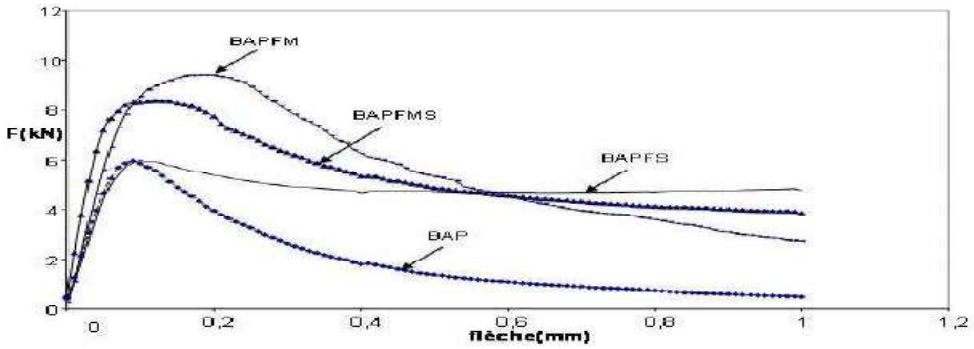


Figure I.38.b : Détail jusqu'à une flèche de 1mm

Figure I.38 : Courbe effort-flèche pour différentes compositions **[106]**

Kawamata et al **[109]** ont montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliorait le comportement à la flexion des bétons.

B. Comportement à la compression et à la traction

Dans la même étude réalisée par Alcantara **[106]**, l'auteur a conclu que la résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de

l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/C.

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

À partir d'essais de traction directe effectués par Pons et Al **[110]**, Les auteurs en ont tiré les principales conclusions ci-après ;

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

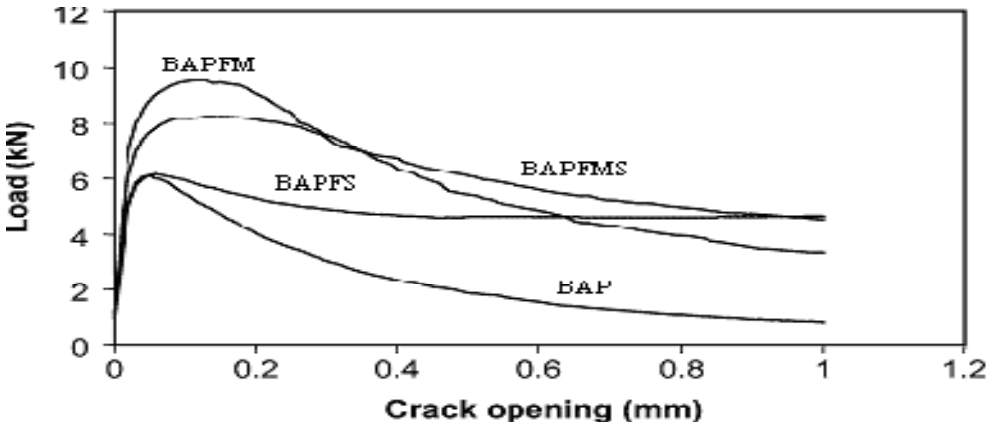
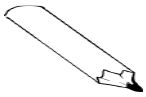


Figure I.39: Comportement à la traction de différentes compositions **[110]**

Les fibres végétales



Le deuxième sous chapitre porte sur les fibres végétales (palmier dattier) qui seront utilisés dans cette étude. On présente également les compositions chimiques de fibre sur lesquelles on s'appuiera pour la caractérisation des effets de la fibre sur le comportement des MAP aux états frais et durci.

I.7. Les fibres végétales

Depuis l'apparition des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre (vers 1940), les composites se sont énormément développés et impliqués dans de nombreux secteurs : aéronautique, automobiles, bâtiment… Toutefois face à des contraintes économiques et environnementales toujours plus exigeantes, l'utilisation de renforts cellulosiques et lignocellulosiques (fibres végétales) dans les composites à matrice organique apparaît aujourd'hui comme une alternative de choix. L'intérêt pour ces fibres réside notamment dans leurs bonnes propriétés spécifiques : biodégradabilité, abondance, caractère renouvelable et faible coût. La recherche sur le sujet s'est ainsi fortement dynamisée au cours de ces dernières années et un certain nombre de produits commencent à apparaître sur le marché (bardage, palettes, fenêtres…). De nouvelles applications et des composites plus performants sont déjà anticipés, mais les connaissances restent insuffisantes et des études doivent être menées afin de mieux comprendre certains mécanismes.

Fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges **[111]**. Montré dans la (**Figure I.40**).

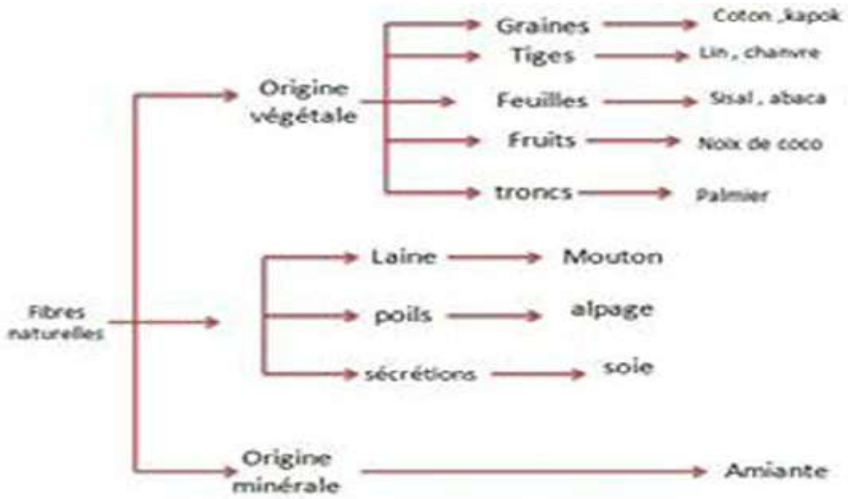


Figure I.40: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine **[112]**

Les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine; il existe aussi, en faible proportion, des constituants extractibles comme les protéines ou encore des composées inorganiques. La proportion d'holocellulose (comprenant la cellulose et l'hémicellulose) et de lignine varie selon les fibres naturelles et l'âge de ces fibres. La composition dépend de la condition de croissance, de l'âge du végétal, des conditions climatiques et bien sûr de la nature des fibres **[113]**.

Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant l'élément structurant très rigide qu'est la cellulose

La figure (**Figure I.41**) ci-dessous représente la structure du bois.

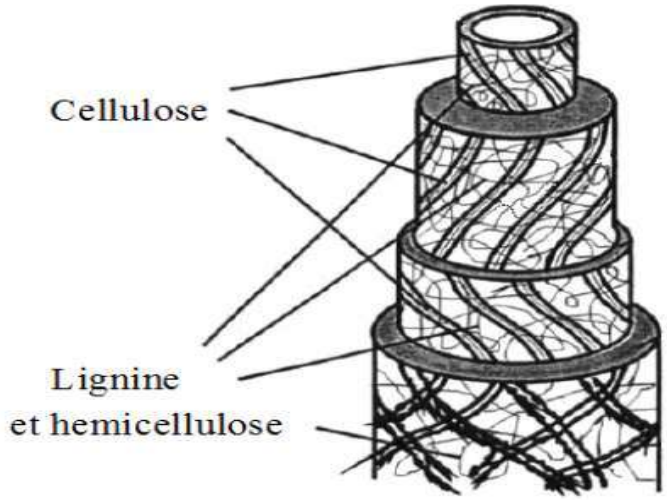


Figure I.41: Structure du bois **[111]**

I.7.1. Morphologie de la fibre végétale

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La (**Figure I.42**) représente la variation du diamètre le long de la fibre de lin **[114].**

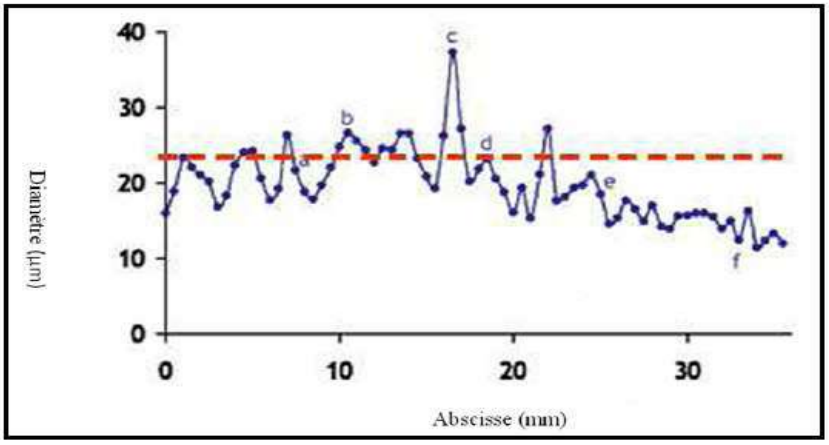


Figure I.42 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin **[114]**

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donné importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

La **(Figure I.43)** présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton.

D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcée par de telles fibres **[115].**

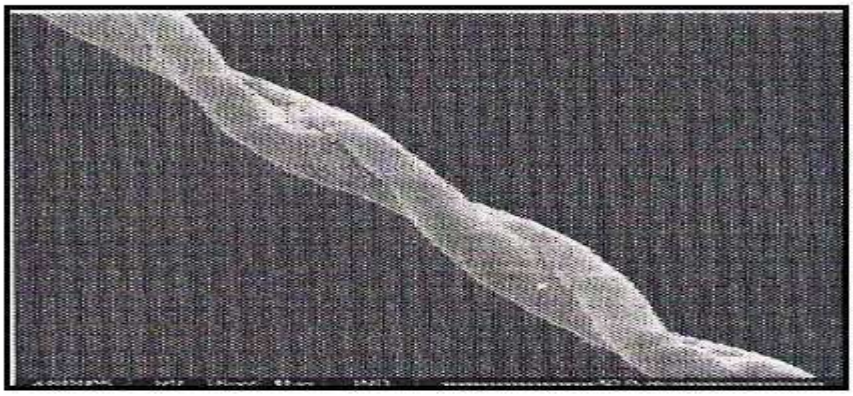


Figure I.43 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton **[115]**

I.7.2. Structure de la fibre végétale

La fibre végétale est un composite en elle-même. Le renfort est constitué par les couches de microfibrille cellulosiques en partie cristalline. Ce dernier est enrobé d'une matrice polysaccharidique amorphe (hémicellulose et pectine) qui est associée par liaison hydrogène et covalentes à la lignine **[116].**

La fibre végétale est composée de plusieurs parois parallèles à l'axe de la fibre et disposée en couche superposée dans le sens radiale. Ces différentes couches qui forment la lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire. Ces dernières bordent un lumen de diamètre variable suivant l'espèce. La paroi secondaire est composée de trois couches de microfibrilles (S1, S2, S3). La Structure du bois montré dans la **(Figure I.44).**

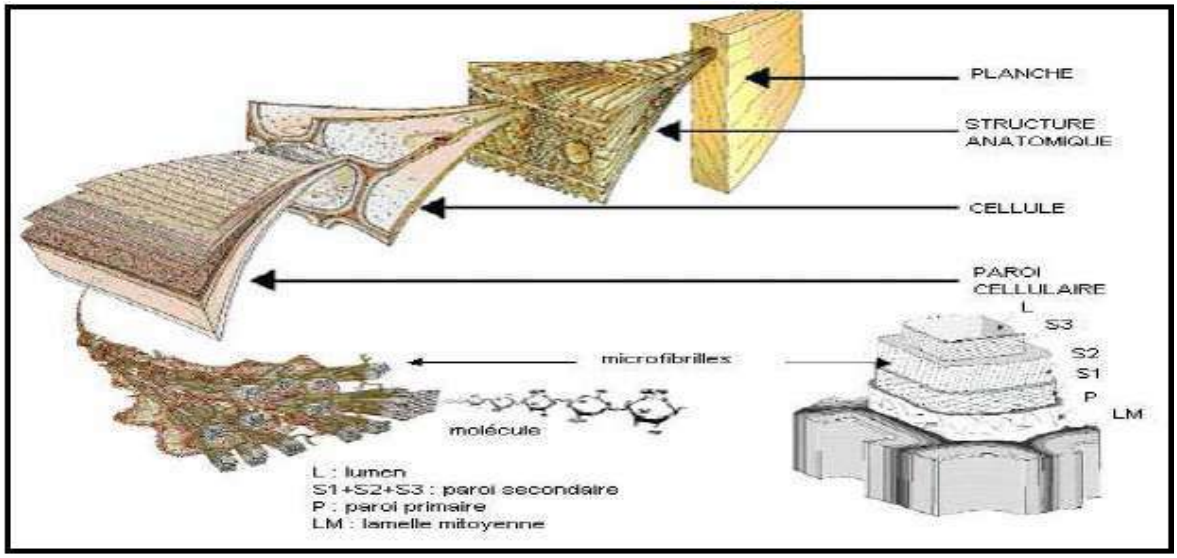


Figure I.44 : Structure du bois (observations multi échelles) **[116]**

Les microfibrilles décrivent par rapport à l'axe de la fibre, un angle micro fibrillaire (MAF) dont la valeur varie d'une espèce à l'autre. L'orientation des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule joue un grand rôle dans les propriétés mécaniques des parois des fibres, plus que l'angle des microfibrilles augmente, le module de Young (une mesure de la rigidité) décroît, tandis que l'extensibilité des parois augment **[117].** La (**Figure I.45**) représente modèle de description de la structure d'une fibre végétale.

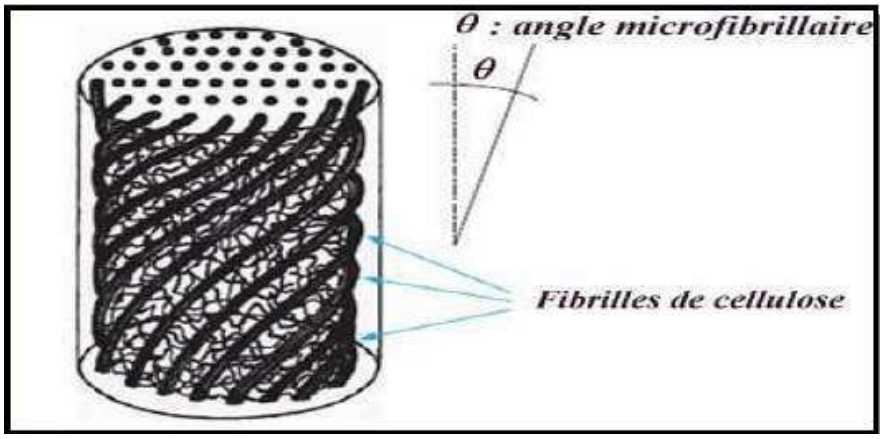


Figure I.45 : Modèle de description de la structure d'une fibre végétale [**117]**

I.7.3. Les différents types de fibres végétales

Il existe une grande variété de fibres végétales dont on peut citer : Le sisal, le jute, le coir (fibre de caco), bois, bambou et le palmier.

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leurs provenances. A savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface. Elles sont utilisées généralement dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et du béton **[118].**

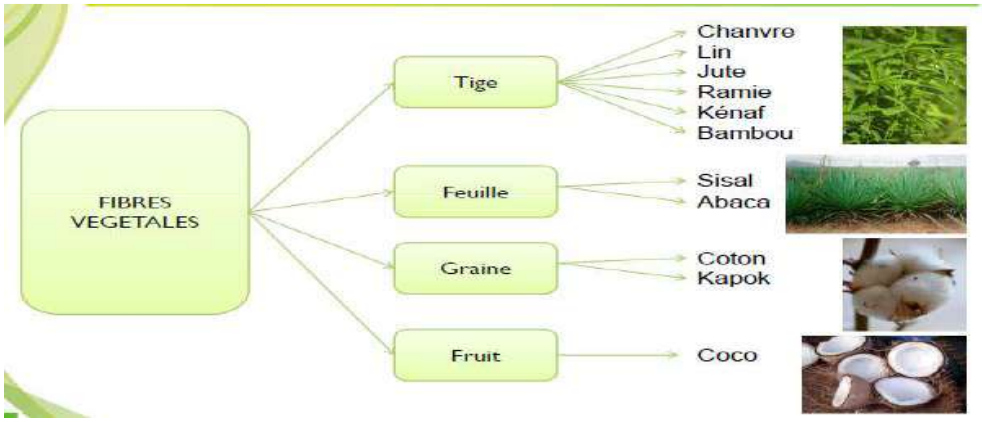


Figure I.46 : Classement des fibres végétales

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 **[119].** De ces fait, plusieurs chercheurs tel que : NILSSON **[120],** AYYAR et al **[121]** ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

B. Les Fibres de Tiges

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

de urena et de chanvre **[118].** NILSSON **[120]** 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 SWAMY et al **[119],** KRIKER **[118]** 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 **[122].**



Figure I.47 : Fibres végétales

I.8. Le palmier dattier

La valorisation des déchets d'origine végétale (fibres, tissus, tiges, …) pour le développement du secteur de la construction vise plusieurs objectifs : économique, technique et environnemental. Leurs disponibilité en abondance dans la nature, leurs propriétés physico-mécaniques et thermiques, permet de les classer parmi les ressources stratégiques des énergies renouvelables qui peuvent être exploitées énormément dans la confection des matériaux destinés à des systèmes constructifs ou à des systèmes de remplissages réalisés à une cadence élevée surtout dans le domaine de l'habitat collectif et/ou individuel.

L'Algérie dispose d'une richesse importante en matière de palmier dattier: 18.6 millions de palmiers dattiers qui lui permettent d'être classé cinquième au monde. L'entretien annuel des palmiers dattiers produit un gisement renouvelable estimé à 200 000 tonnes de déchet renouvelable constitué essentiellement de palmes sèches **[123].**

Les études précédentes effectuées sur la valorisation des déchets d'origine végétale dans les formulations de mortiers et bétons **[124]**, **[125]**et **[126]**, montre une tendance du comportement au jeune âge différente de celle relevée à moyen et à long terme. En effet, si à court terme, il a été enregistré une amélioration des valeurs obtenues en traction et en compression pour les mortiers et les bétons renforcés en fibres de palmier dattier, les valeurs de la résistance caractéristique (28 jours) obtenues en compression peuvent avoir une diminution **[127].** Cette diminution a été attribuée par certains chercheurs à la dégradation permanente des fibres.

I.8.1. Généralités sur le palmier dattier

Le palmier dattier (Phoenix L. Dactylifera) connu depuis l'antiquité, était considéré par les égyptiens comme un symbole de fertilité, représenté par les carthaginois sur les pièces de monnaies et les monuments, et utilisé par les grecs et les latins comme ornement lors des célébrations triomphales. Dans la tradition chrétienne, les feuilles représentent un symbole de paix et rappellent l'entrée de Jésus dans Jérusalem. Le terme générique est un nom antique déjà cité par Théophraste, utilisé par les grecs pour dénommer les plantes de ce genre. Celui-ci dérive de phoenix = phénicien, car ce serait justement les phéniciens qui auraient diffusé cette plante. Le terme spécifique est composé de dactylus = dattes (des grecs dactylos) et fero = je porte, soit "porteur de dattes".

Jusqu'à la fin du 19ème siècle, l'Algérie occupait le 3ème rang parmi les grands pays producteurs et une place de choix au niveau du commerce extérieur des dattes grâce, notamment, à la qualité de celles-ci **[127].**

Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe**.** De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers males et des palmiers femelles. Le palmier est très élancé, généralement il a hauteur entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois 30 mètres, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximums, forment une couronne

apicale clairsemée la (**Figue I.48**). Elles sont pennées, longues jusqu'à 6m; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte **[129].**



Figure I.48: Photo des palmiers dattiers **[129]**

I.8.2. Utilisations générales et produits issus des palmiers-dattiers

La population rurale tient beaucoup aux palmiers dattiers et ces autres organes du bourgeon à la racine. La datte est la seule à procurer à l'Homme des aliments de grande valeur énergétique. Outre sont intérêt commercial qui est déjà important et devrait pouvoir se développer. La consommation des dattes frais et leur utilisation, alors en plus de produit alimentaire des dattes tous ses autres organes ou partis d'organe ont utilisés selon leur état : jeune, vert, murs, frais, secs etc.…

Le rachis débarrassé des aiguillons et folioles puis refendu est utilisé pour fabriquer des nattes, des tapis, des corbeilles, des paniers, des chapeaux et des éventails **[128]**.

La (**Figure I.49**) montre quelques produits d'artisanat.



I.49.a : paniers



I.49.b : support de plat tressé

Figures I.49: Quelques produits d'artisanat **[128]**

Malgré, une faible exploitation de la filière à Toliara, les feuilles du Phoenix dactylifera sont utilisées comme clôtures (**Figure I .50**), pour faire des toitures, des murs de petite maison,

pour la vente du café, du thé, du pain et autres marchandises ou services (**Figure I.51**). On peut confectionner l'habillage des douches (**Figure I.52**). La base des palmes sèches sont localement utilisées aux cuisines comme bois de chauffe et de chauffage domestique. Pour les usagers des feuilles vertes ; les palmes apicales du cœur sont épargnées, permettant le renouvellement de la taille sur le même arbre tous les 3 ans.



Figure I.50: Clôture en feuille de palme **[128]**



Figure I.51: Petite maison en feuilles de palme **[128]**



Figure I.52: Douche en feuilles de palme **[128]**

I.8.3. Phénologie du palmier dattier

Le palmier dattier est un arbre à feuilles persistantes. Celles-ci portent le nom de palmes et ont une durée de vie de 3 à 7 ans, leur formation s'achève en une année. Après une légère période de repos, la période végétative commence par l'apparition de nouvelles palmes ou palmes de l'année. Au début de la période reproductrice, et à l'aisselle des feuilles ou palmes, des bourgeons donnent naissance à des spathes. Le palmier dattiers est dioïque.

En effet, Le palmier est une herbe géante de 20 à 30m de hauteur, au tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles, les feuilles sont pennées, divisées avec une longueur de 4 à 7m. Il porte des inflorescences mâles ou femelles **[130].**

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 parties **[130],** à savoir la (**Figure I.54**)

- **Palmes :** La palme ou « Djérid » est une feuille pennée dont les folioles sont régulièrement disposées en position oblique le long du rachis qui s'étend au pétiole. Les segments inférieurs sont transformés en épines, plus ou moins nombreuses, et plus ou moins longues. Le pétiole (Kornaf) est dur et relativement rigide chaque année, le palmier dattier produit un certain nombre de palmes à partier de bourgeon et perd un nombre similaire de palmes par dessèchement la (figure I.53) présente shéma d'une palme de palmier dattier.

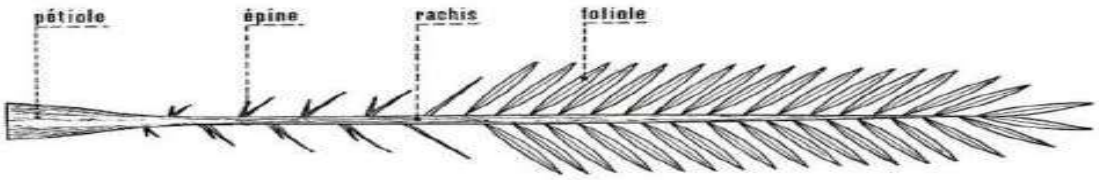


Figure I.53: Schéma d'une palme de palmier dattier **[130]**

- **Jeune palme :** La jeune palme est enroulée pendant toute sa croissance comme les brins d'herbe ou les feuilles de bambous.
- **Régime de dattes :** Un régime de dattes est la partie qui supporte les fruits du palmier. On parle aussi de régime pour les bananes. Il est accroche au palmier par la hampe, qui est d'ailleurs tellement résistante qu'elle doit être sciée pour être décrochée. Il peut contenir plus de 1000 fruits.
- **Dattes :** Ces fruits sont des baies de forme ovale de 3 cm de long. La chair très sucrée entoure la graine. Récoltées en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon les variétés ; elles seront ensuite séchées au soleil. Un palmier dattier peut produire de 10 jusqu'a 100 kg par an.
- **Gourmand :** Un gourmand est une branche secondaire qui se développe sur une branche principale d'une plante. Il faut généralement les supprimer car comme leur nom l'indique, ils sont gourmands et épuisent inutilement la plante.
- **Stipe :** Le stipe rappelle le tronc des arbres, mais il est en fait composé de fibres végétales des anciennes feuilles. Son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques.
- **Cicatrices annulaires** : On a l'impression que le palmier a un « tronc recouvert d'écailles ». Ces cicatrices annulaires correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) tombe. Elles permettent au grimpeur de s'y accrocher pour atteindre les dattes.
- **Rejet :** Le rejet est une jeune pousse du végétal, dont il est possible de planter pour obtenir un nouveau palmier. Celui-ci sera choisi par l'homme parmi une sélection des meilleurs palmiers.

- **Bulbe :** Se situant à la base du stipe, le bulbe constitue la réserve du palmier. De là part le système racinaire d'ou émergent les racines primaires courtes de moins d'un mètre, et longues de plus de 20 mètres.
- **Racines :** Elles sont nombreuses et profondes jusqu'a 20 mètres ; elles sont capables d'aspirer 500 litres d'eau par jour.

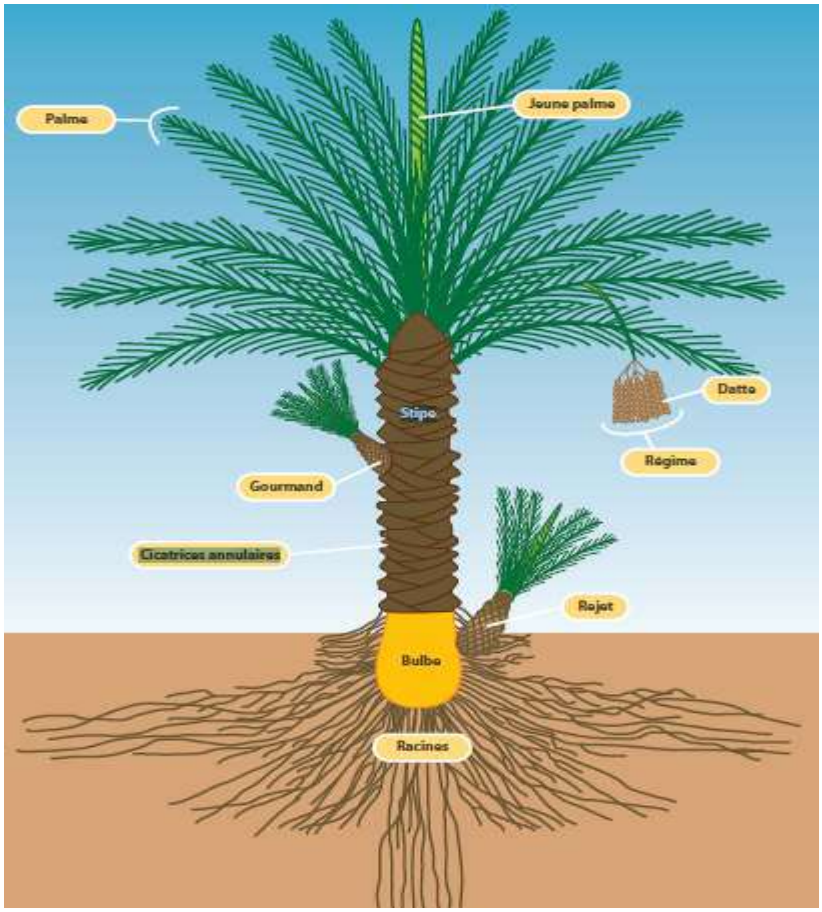


Figure I.54 : Structure générale d'un palmier dattier **[130]**

I.8.4. Fibre de palmier dattier

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant quatre types de fibres **[130].**

- Fibres de bois de tronc.
- Fibres de feuilles au niveau des pédoncules.
- Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe).
- Fibres de surface autour de son tronc ou de bases de palmes (pétiole)
- Fibres de liffe (entre les Kornafs, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le liffe).

I.8.4.1 Structure des fibres

Les techniques microscopiques comme la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET), sont généralement utilisés pour l'analyse de la microstructure des fibres. La (**Figure I.55**) présente un exemple de l'examen de la fibre de palmier dattier par microscope à balayage (MEB).

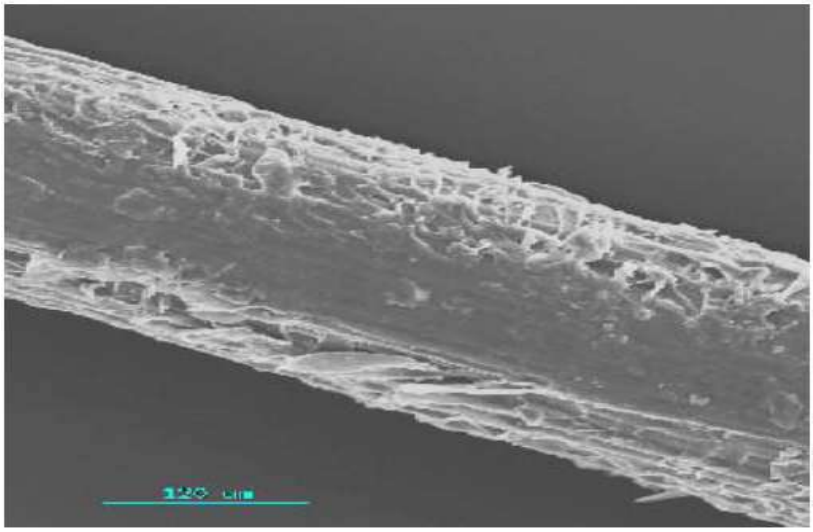


Figure I.55 : Micrographie de fibre de palmier dattier par microscope à balayage **[130]**

I.8.4.2. Composition chimique des fibres

Comme nous l'avons vu précédemment les composées les plus majoritaire sont la cellulose, l'hémicellulose les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe.

Dans la fibre, la cellulose est concentrée à l'intérieur de la fibre (**Figure I.56**). Les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignines et d'hémicelluloses et les lamelles de jonction inter fibres sont composées presque uniquement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines (polymères de polysaccharides acides) augmente la complexité de la matrice. Le réseau polysaccharidique peut également être solidifié par un réseau secondaire de protéines HRGP (Hydroxyproline Rich Glyco Proteins) **[131].**

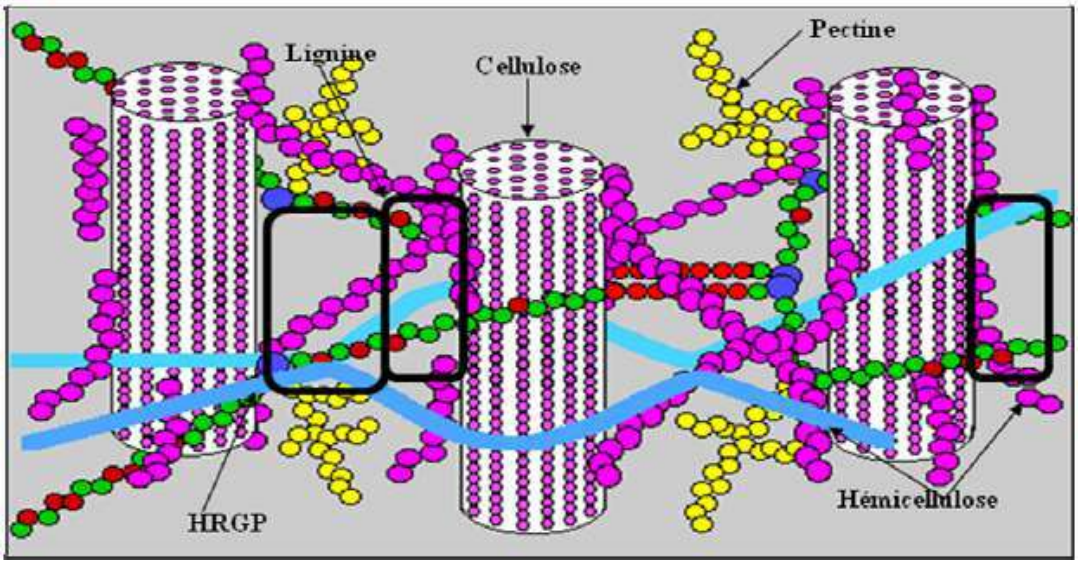


Figure I.56 : Représentation schématique d'une fibre végétale **[131]**

I.8.4.2.1. Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale. Ce polymère linéaire de glucose présente est à l'état presque pur (>90%) dans la fibre de coton. Il est aussi, avec de la lignine, l'un des constituant essentielle du bois (50%) **.** Selon Willtatter et Zechmeister (1913) la formule brute exacte de cette macromolécule est (C6H10O5).

Elle est composée des unités de D-anhydrocopyranos reliées entre elle par des liaisons β 1-4. L'unité répétitive est le Cellobiose (deux glucoses réunis). Ces unités élémentaires s'associent par paquet pour former les microfibrilles **[132].** Représentation de la chaine de cellulose dans la (**Figure I.57**).

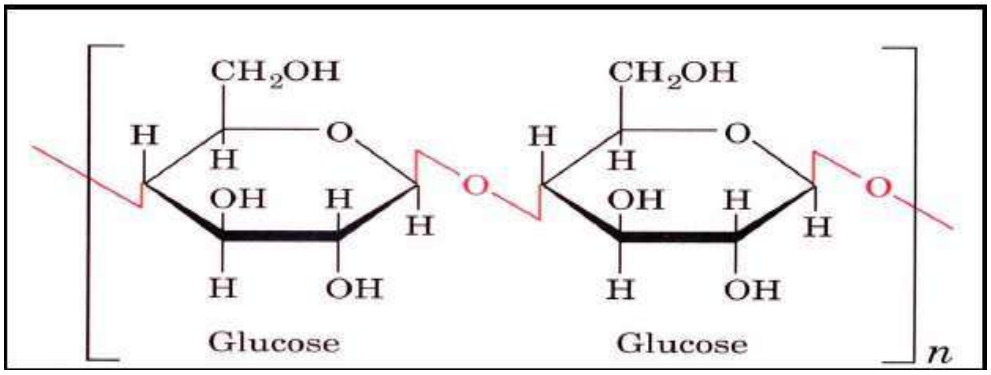


Figure I.57: Représentation de la chaîne de cellulose **[132]**

n : degré de polymérisation.

Le nombre de maillons D-glucopyranose (n), appelé degré de polymérisation (DP) n'est pas connu dans la cellulose native. De plus, il est toujours exprimé comme une moyenne puisque dans la plupart des échantillons, il y a une large distribution de masse moléculaire. Il diffère énormément selon l'origine de la cellulose, il est d'environ 26500 dans l'algue valonia 9000 dans le chanvre et dans le lin, et de l'ordre de 8000 pour l'épicéa **[132], [133].**

La diffraction des rayons X par les monocristaux de la cellulose a permis d'établir que deux motifs β-D-glucopyranosyles adjacents ne sont pas dans le même plan moyen. Ceci est du aux liaisons hydrogène intramoléculaire entre l'oxygène hétérocyclique et l'hydrogène du groupement hydroxyle fixée sur le carbone 3' **(Figure I.58)** Ainsi la dimension de l'unité cellobiose est toujours de 10.3Å.

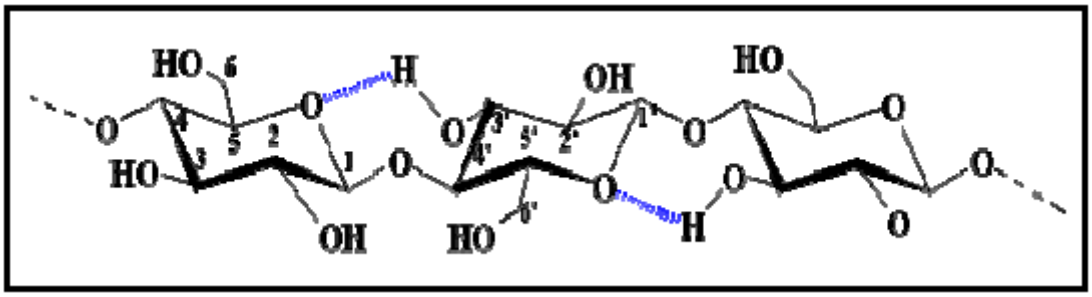


Figure I.58 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculaires **[133]**

En raison du grand nombre de groupement Hydroxyles sur la chaine, il existe de multiples possibilités de liaisons hydrogène intermoléculaires. De plus il existe d'autre liaisons hydrogène mettant en jeu des molécules d'eau qui sont ainsi intimement liée à la cellulose. Toutes ces contraintes font de la cellulose une molécule fibrillaire et partiellement cristalline **[134].**

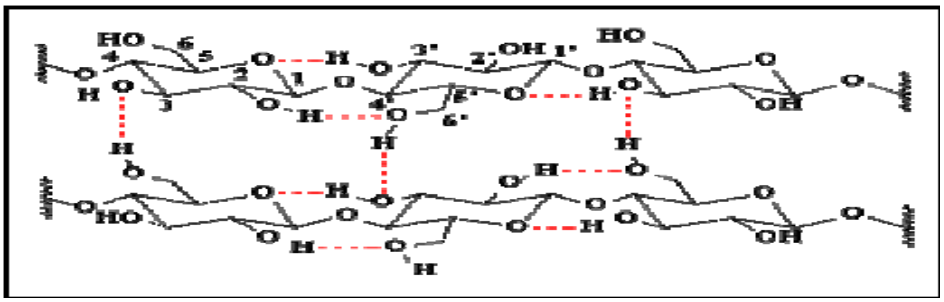


Figure I.59 : Liaison hydrogène inter et intramoléculaires au sein de la fibre de cellulose **[133]**

Cet arrangement moléculaire ordonné des chaines cellulosiques parallèles entre elles est la base d'un édifice cristallin que l'on appelle microfibrilles. La hiérarchie de structure et l'organisation supramoléculaire de la cellulose sont schématisées dans **(Figure I.60)** [**132].**

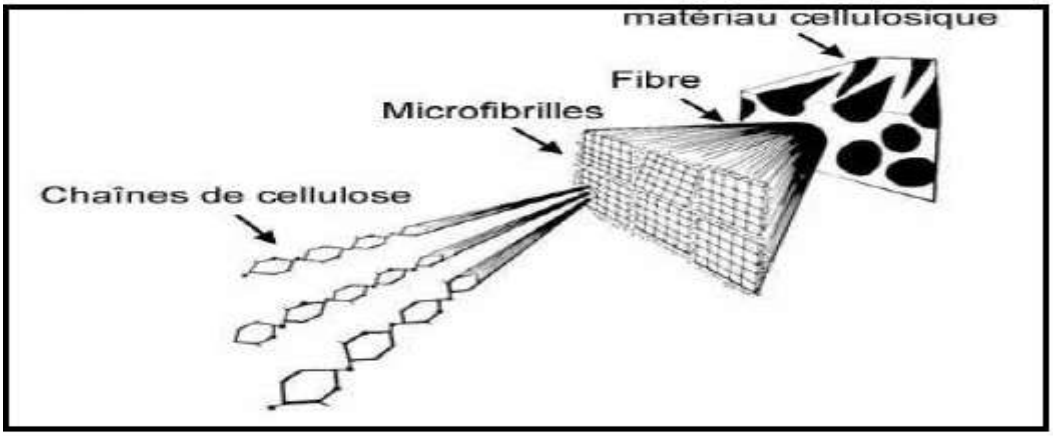


Figure I.60 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique **[132]**

Dans la cellulose pure, la structure moléculaire est presque parfaitement régulière car elle ne contient de défauts que dans une unité sur mille environ. Le centre de ces microfibrilles est très cristallin tandis que les chaînes de surface sont de nature plus désordonnées et constituent des zones para cristallines. Ces zones, ainsi que les défauts de cristallinité qui survienne lors de la biosynthèse de la cellulose forment la phase amorphe de la cellulose. Donc les microfibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines parfaitement ordonnées et de zones amorphes, au contraire, totalement désordonnées. **(Figure I.61) [131].**

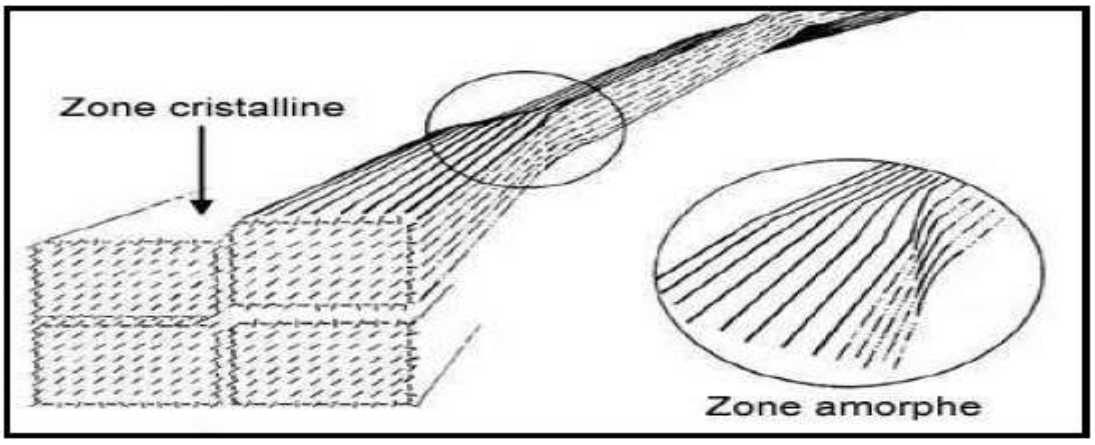


Figure I.61: Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille **[132]**

I.8.4.2.2. Hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tout polysaccharide soluble dans l'eau et pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions acides. Les hémicelluloses sont une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents). Elles sont donc assez mal définies. Dans leurs états naturels, leur structure est fonction de l'espèce végétale. Elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300. La **(figure I.62)** montre les unités monosaccharidiques les plus représentatives des différentes familles d'hémicelluloses. Ce sont des polysaccharides dont la chaîne principale linéaire est constituée respectivement de xylose, de mannose et de galactose **[135].**

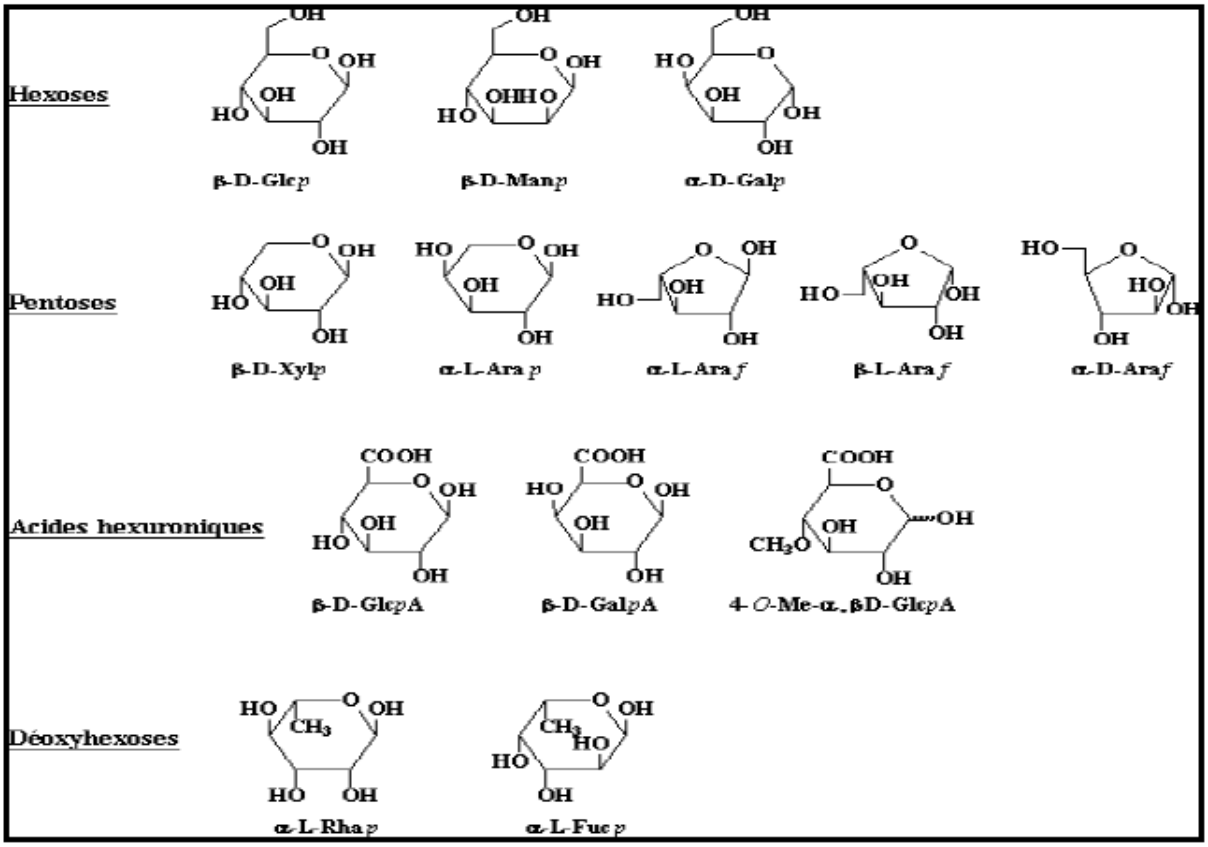


Figure I.62 : Principaux glucides constituant les hémicelluloses **[135]**

I.8.4.2.3. Pectines

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux.

Sur le plan structural, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent un enchaînement d'unités d'acide α-D-galacturonique liées entre elles par des liaisons α (1-4), interrompu par la présence d'unités Lrhamnopyranose.

Les pectines portent aussi des subsistances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec le méthanol ou l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important sur les propriétés physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel **[136**].

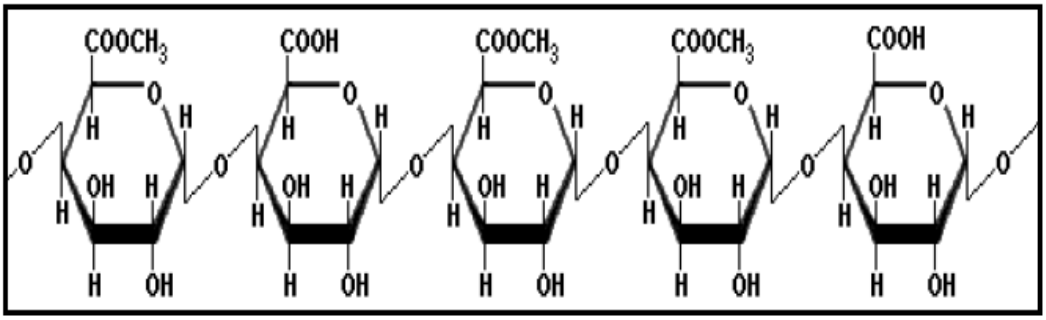


Figure I.63 : Structure de la pectine **[137]**

I.8.4.2.4. Lignine

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou « protolignine » constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière ''incrustante'' de la cellulose. La lignine est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique **[131].**

Parce qu'il est impossible d'isoler la lignine native du bois sans la dégrader, sa masse moléculaire reste encore inconnue. Nous pouvons trouver des masses moléculaires approximatives dont les valeurs moyennes sont de 5000 à 10000 g/mol pour les bois durs (des feuillus), et de 20000 g/mol pour les bois tendres (des résineux). La **(figure I.64)** présentes les motifs élémentaires de la lignine.

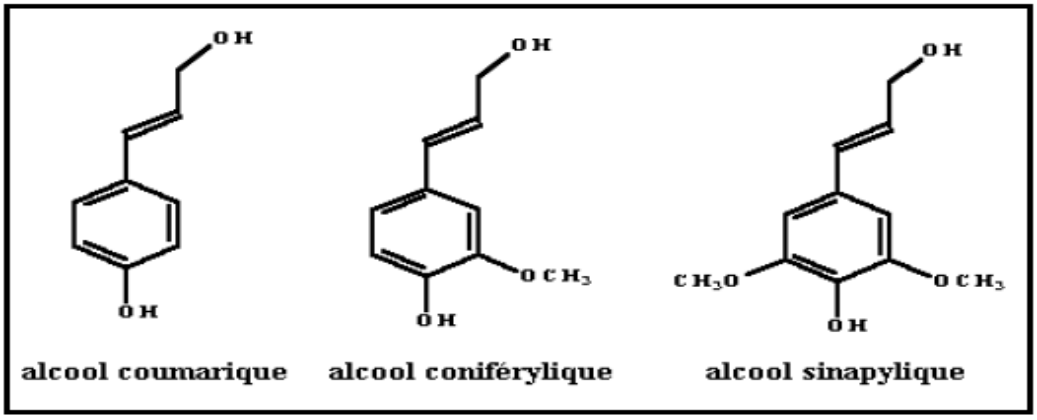


Figure I.64 : Motifs élémentaires de la lignine **[131]**

La lignine est peu sensible à la dégradation biologique et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires **[131].**

I.8.4.2.5. Extractibles

Ce sont des molécules de faible masse molaire qui remplisse la lumière des cellules. Ils représentent 2 à 5 % de la masse sèche. La plupart de ces extractibles sont solubles dans l'eau ou des solvants organiques, d'où leur dénomination. La composition en extractibles varie en fonction de l'essence considérée et influe sur la couleur et l'odeur. Il s'agit de tanins, de pectines, de sucre et d'autres composés **[137].**

I.8.4.3. Matrice minérale et fibres végétales

Une des applications techniques les plus réussies dans le Génie Civil est le renforcement du béton par l'acier. En effet, le béton armé est un matériau composite constitué d'une matrice cimentaire additionnée à un renfort par barres d'acier.

Les nouveaux composites utilisables dans l'industrie de la construction doivent allier performances mécaniques et liberté architecturale tout en diminuant l'impact environnemental lors du processus de transformation. Les composites à matrice minérale constituent une solution envisageable afin de répondre à ces critères **[139]**.

L'introduction de fibres végétales pour le renforcement est une technique très ancienne. En effet, nos prédécesseurs utilisaient de la paille pour renforcer l'argile, et le crin (poils de chevaux) pour renforcer de nombreux mortiers et du plâtre **[139].**

Les composites fibres/ciment (CCF) constituent une alternative intéressant dans le domaine de la construction au regard de son efficacité énergétique et économique et de ses performances environnementales.

Les applications des composites à matrice minérale augmente actuellement et touchent dorénavant les structures porteuses primaires. Par conséquent, des informations détaillées sont nécessaires pour la conception de structures CCF. Des travaux de recherches étudient non seulement le comportement mécanique du matériau mais également le développement des procédures de conception des éléments structuraux en utilisant ce genre de matériau **[139]**.

I.8.4.3.1. Compatibilité des fibres végétales avec le ciment

L'aspect important du composite ciment fibres végétales est la compatibilité physique et chimique des fibres végétales avec le ciment. Il est bien entendu qu'avec l'addition des fibres végétales dans la matrice cimentaire, les temps de prises des ciments augmentent. L'hémicellulose, l'amide, les tanins et les sucres contenues dans les fibres sont en partie responsable de ces retards de prise.

L'alcalinité élevée de l'eau dans les pores de la matrice de ciment affaiblit les fibres de cellulose, induit leur minéralisation et par conséquent, l'affaiblissement de la ténacité des composites **[140].**

I.8.4.3.2. Interface fibre-matrice : notion d'adhésion

La notion d'adhésion ne peut être dissociée de la nature des surfaces impliquées. Ces dernières présentent des propriétés qui les rendent plus ou moins idéales.

Les phénomènes d'adhésion aux interfaces fibre-matrice jouent un rôle essentiel sur les propriétés des matériaux composites. De telles interfaces sont le siège de phénomènes physico-chimiques complexes. Ces derniers sont dus aux interactions moléculaires entre deux matériaux de nature et de propriétés différentes.

Ces interfaces doivent êtres en mesure de supporter toutes contraintes mécaniques, résiduelles ou externes, et les transmettre de la matrice à la fibre pour que les matériaux composites présentent les propriétés mécaniques requises **[141].** La taille de la section des fibres influence considérablement la microstructure de l'interface fibre-matrice :

- **Pour les micros fibres**

Les fibres ont des diamètres inférieurs ou égaux à celui des particules de ciment (≤70µm). Les diamètres des fibres et des particules de ciment sont du même ordre de grandeur. Donc la microstructure de l'interface est dense et peu différente à celle de la matrice.

- **Pour les macros fibres**

Les fibres ont des diamètres supérieurs à celui des particules de ciment. La microstructure de l'interface ressemble à celle de l'auréole de transition de granulat dans le béton. Sa formation est entre autre due à un effet de paroi et de ressuage au niveau de l'interface. Elle peut se composer d'un filme duplex, d'une couche discontinue de cristaux issus de l'hydratation de ciment et d'une zone poreuse.

L'adhésion interfaciale est une combinaison de trois phénomènes agissant simultanément à des degrés différents

- Interpénétration mécanique entre la pate de ciment et la surface de la fibre ;
- Adhésion physique moléculaire ;
- Adhésion Chimique.

I.9. Modification des fibres lignocellulosiques

L'utilisation de fibres lignocellulosiques dans les matériaux polymères tend à se développer car elle permet de répondre à deux préoccupations : l'utilisation de matériaux d'origine renouvelable et biodégradable et la valorisation de ressources agricoles, notamment pour les pays émergents. Les propriétés de ces matériaux composites sont bien évidemment intimement liées aux propriétés de chacun de leurs composants, mais également à l'interface fibre-matrice. En effet, il existe un problème récurrent de compatibilité entre les fibres hydrophiles et la plupart des matrices qui sont en général hydrophobes. Pour modifier et contrôler cette interface, il est possible d'agir soit sur la matrice polymère soit sur les fibres.

Pour ce qui concerne les fibres, des méthodes physiques : traitements thermiques, corona, plasma, et des méthodes chimiques : imprégnation, greffage, couplage ont été décrites **[138].**

I.9.1. Modification de l'interface fibre-matrice

Afin d'assurer une bonne compatibilité des fibres végétales avec la matrice cimentaire, Il existe de nombreuses techniques. Ces dernières permettant la mise en place de liaisons chimiques au niveau de l'interface. Ces diverses techniques peuvent être divisées en deux

catégories : les méthodes de modification physiques et les méthodes chimiques. Le but de ces modifications est l'amélioration de l'adhésion par la création de liaisons qui n'existaient pas au paravent. La surface est donc au cœur de l'action et subit des modifications **[141]**.

I.9.1.1. Méthodes physiques de modification de la surface

A. Agents dispersifs

Les cires, et les paraffines sont largement utilisés dans les composites à base de bois. D'autres additifs comme les élastomères et les plastifiants sont aussi utilisés. Ces produits agissent sur des propriétés spécifiques qui entraînent des modifications de surface permettant d'améliorer d'une manière directe et indirecte la fabrication du composite. Ces modifications contribuent à faciliter le procédé de fabrication (changements des paramètres du procédé : baisse de la température, homogénéisation du mélange, diminution des contraintes mécaniques lors du processus) **[141].**

Les cires sont des constituants des fibres naturelles, qui peuvent être extraits avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique.

Les composites à matrice polymérique (CMP) sont généralement constitués d'une matrice de résine (substance macromoléculaire formée par polymérisation ou polycondensation) et d'un renfort de fibres.

Les matrices communément utilisées dans l'élaboration de composites à fibres naturelles vont des thermoplastiques, tels le polypropylène et le polyéthylène, aux thermodurcissables tel le polyester.

Si nous assistons à un regain d'intérêt pour l'utilisation des fibres végétales comme renforts, cette application existe depuis de nombreuses décennies.

B. Traitements par décharges électriques (corona, plasmas froids)

La modification des fibres cellulosiques par ce type de traitement a connu plusieurs succès dans le cadre d'études sur les composites. Le traitement Corona, ou effet couronne, est une technique d'activation de surface par oxydation. Cela se traduit par une augmentation de la concentration des groupements aldéhyde lors de l'activation de la surface des fibres.

On obtient sensiblement le même type d'action avec les plasmas à basse température. Ce traitement modifie la surface des fibres sans affecter les propriétés intrinsèques du matériau. De plus cette technique ne nécessite pas l'usage de solvant et les temps de traitement sont courts.

La variété de modifications possibles avec les plasmas provient du choix du gaz impliqué dans le traitement. L'oxygène entraîne la formation de groupes plutôt acides (accepteurs d'électrons), alors que l'azote ou l'ammoniaque entraîne la formation de groupes plutôt basiques (donneurs d'électrons). Ce type de solution par décharge électrique nécessite toutefois une technologie assez complexe **[142].**

C. Mercerisation

Bien que ce ne soit pas vraiment une technique 'physique', c'est une ancienne technique de modification chimique couramment pratiquée par l'industrie textile du coton. Il s'agit d'un traitement alcalin en température qui tend à être adapté aux fibres naturelles. Certaines caractéristiques mécaniques et d'absorption sont améliorées par la mercerisation. L'estérification de la cellulose par substitution des groupes hydroxyles a été citée par de nombreux chercheurs **[141]**.

I.9.1.2. Méthodes chimiques de modification de la surface

Plusieurs approches ont été rendues compte de l'utilisation du traitement chimique des fibres de cellulose pour réduire leur caractère hydrophile et améliorer leur adhérence avec la matrice.

La modification de la surface par les méthodes chimiques a pour objectif de rendre compatibles deux matériaux par l'introduction d'un troisième ayant des propriétés intermédiaires **[141].**

Toutes les recherches faites avec ce type de modification ne concernent que la modification des fibres cellulosiques, microfibrilles ou whiskers de cellulose. Dans la présente thèse, on appliquera cette modification directement aux fibres de palmier dattier préalablement traitées par des mélanges de solvants organiques.

A. Activation des fibres : prétraitement par les alcalins

La majorité des traitements connus (acétylation, benzoylation…) sont précédés par un prétraitement dans une solution alcaline (**Figure I.65**). Les fibres sont traitées avec une

solution de NaOH (10%) durant une heure. Elles sont ensuite lavées avec de l'eau pour éliminer l'excès de NaOH. Le dernier lavage se fait avec de l'eau distillée contenant un peu d'acide acétique, les fibres sont séchées à l'air. Ce traitement améliore les caractéristiques adhésives de la surface des fibres en éliminant les impuretés naturelles et artificielles **[143].**



Figure I.65 : Traitement des fibres par une solution de soude **[143]**

Taha et al. **[144]** ont traité les fibres de palmier dattier dans une solution de soude (2% à 5%) à 23°C pendant 2, 4, 6 et 24h pour l'incorporation dans des composites à base de polymères. Cette modification a permis un lavage des impuretés de surface des fibres et d'une partie des hémicelluloses qui influe sur les propriétés d'absorption notamment celle de l'humidité. En effet, la réduction des hémicelluloses dans ces fibres réduit la capacité d'absorption d'eau dans la fibre **[144].**

Pour optimiser l'interface fibre de lin/résine polyester insaturé dans des composites, Balnois et al. **[145]** ont traité les fibres de lin par des traitements successifs : à base de soude (10g/l), d'anhydride acétique et d'acide formique. La modification apporte une augmentation des propriétés d'adhésion entre la fibre et la matrice polymère. De plus, le traitement des fibres de lin par ce procédé rend la surface des fibres plus lisse et diminue sa rugosité **[145].**

Joshy et al. **[146]** ont traité les fibres d'Isora par 1% d'une solution alcaline à 30°C pendant 4h pour les utiliser comme renfort dans une matrice polyester. Les propriétés mécaniques des composites formés sont meilleures avec les fibres traitées qu'avec les fibres employées à l'état brut. Le traitement alcalin des fibres d'Isora donne naissance à un matériau composite avec des modules E' et E'' élevés. De plus, le taux en fibres traitées dans le composite peut atteindre 66% en volume pour seulement 45 % dans le cas des fibres non traitées **[146].**

B. Traitement des fibres par les silanes

La modification par les silanes est une des techniques beaucoup étudiées dans la bibliographie que ce soit la modification directe des fibres lignocellulosiques ou de leurs fibres cellulosiques **[147], [148].**

Grâce à leurs réactivités, les silanes peuvent se coupler chimiquement avec les groupements de la matrice polymère, la modification chimique des fibres par les silanes se fait par réaction

des alcoxysilanes avec les groupes hydroxyle de la cellulose en milieu aqueux acide ou basique. Par exemple Goussé **[147]** a traité des whiskers de cellulose extraits des fibres de tunicier par une série d'alkyldiméthylchlorosilane en milieu acide. Voir la (**Figure I.66**) **[147].**

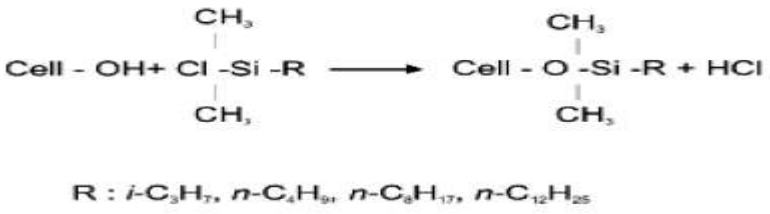


Figure I.66 : Modification par des alkyldiméthylchlorosilane **[147]**

C. Traitement par le permanganate

En vue d'améliorer l'ancrage des fibres de sisal et de coco dans le caoutchouc naturel (NR), Haseena et al. **[148]** procèdent par trempage de ces fibres dans une solution de KMnO4 (1%) dans l'acétone pendant deux minutes suivi par un séchage à l'air ambiant. Le principe de ce traitement est la création de sites radicalaires dans la cellulose des fibres **[150]** ce qui augmente sa réactivité avec les matrices polymères **[149].**

La haute réactivité des ions permanganates Mn7+ facilite le greffage de la matrice polymère sur la cellulose des fibres présenté sur la (**Figure I.67**) **[149].**

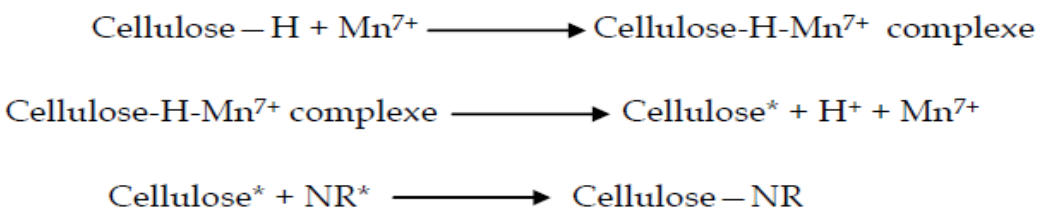


Figure I.67 : Activation du greffage Polymère (NR)/cellulose par le permanganate **[149]**

D. Traitement par benzoylation

Le traitement par benzoylation a été aussi appliqué sur les fibres de coco et de sisal **[152].** Ces fibres prétraitées par la soude ont été trempées dans 50 ml de chlorure de benzoyle pendant 15 min sous agitation continue puis sont filtrées, lavées avec de l'eau et séchées. Les fibres sont ensuite trempées dans l'éthanol durant une heure pour éliminer le chlorure de benzoyle n'ayant pas réagi, puis elles sont lavées à l'eau et enfin séchées **[149], [150].** Le groupement

benzoyle introduit sur le carbone C6 de la cellulose réduit l'hydrophilie de la fibre et améliore sa dispersion dans un composite de matrice polymère **[149]** .montré dans la (**Figure I.68**).

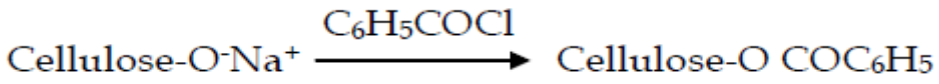
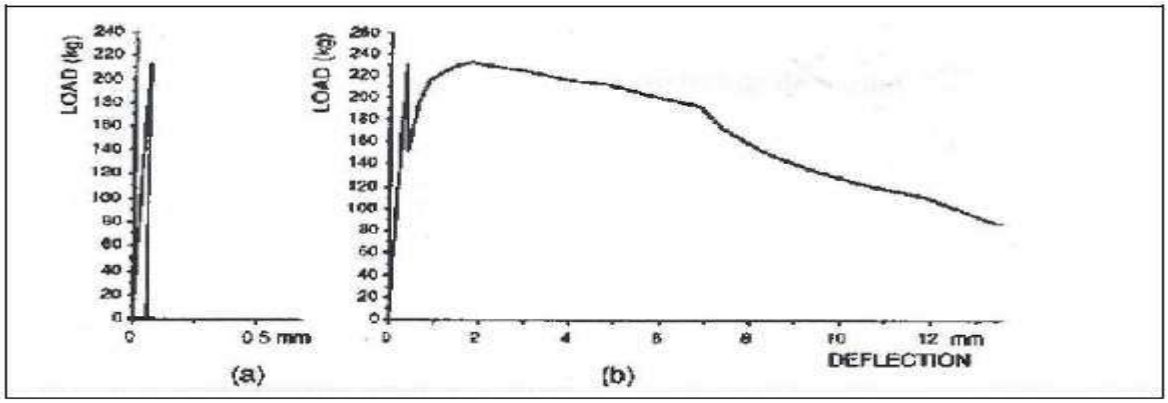


Figure I.68 : Benzoylation des fibres cellulosiques **[149]**

I.9.2. Propriétés mécaniques

Les matrices minérales se caractérisent par une rupture de type fragile malgré leurs bonnes tenues à la compression, La résistance en flexion de ces matrices fragiles, tels que les mortiers, le plâtre ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée).

De plus, une modification notable dans le comportement du matériau est observée après la première fissuration de la matrice : passage d'un comportement fragile à un comportement semi fragile ou légèrement contrôlé **[151].**



I.69.a: Gypse pur **I.69.b** : Composite gypse-fibre de sisal

Figure I.69 : Représentation schématique du comportement en flexion **[138]**

Djoudi et al. [**152]** ont étudié le renforcement de plâtre avec les fibres végétales du palmier (dattier). Les résultats montrent que l'augmentation de la fraction massique des fibres du palmier incorporées fait accroître la ductilité du matériau, les meilleurs résultats sont obtenus pour 1,5% en masse de fibres. Par contre la densité décroît à cause de l'augmentation du volume de vide crée par l'ajout des fibres dans la matrice.

Les fibres végétales changent complètement le comportement rhéologique du matériau et augmentent considérablement sa résistance à la flexion et le rend moins fragile en améliorant son seuil de fissuration.

Bahloul et al. **[153]** ont examinée l'analyse des propriétés mécaniques et physiques des mortiers de ciment à base de fibres cellulosiques d'alfa. Ils ont montré que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les mortiers et que l'ajout de fibres végétales au mortier n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression.

Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice du mortier augmente le volume des vides et diminue la compacité du mortier, d'où une diminution de résistance à la compression. Ils observent aussi que le mortier de fibres donne des valeurs de conductivité thermique λ de l'ordre de 0,8 W/m° C ce qui est assez proche des performances d'un isolant.

Sedan **[154]** a travaillé sur les phénomènes physico-chimiques intervenant lors de l'association de fibres de chanvre avec du ciment, ainsi que leurs impacts sur les propriétés mécaniques des composites élaborés. Ils indiquent que la résistance en flexion de ces

matériaux évolue d'environ de 4,9 MPa pour le ciment à 6.8 MPa pour un composite contenant 16% en masse de fibres.

Les précédents travaux démontrent que l'introduction des fibres végétales dans des matrices cimentaires améliore la contrainte à la rupture en flexion 3 points Des mortiers. On note aussi que la liaison fibre /matrice reste faible. Pour accroître les performances mécaniques et améliorer l'adhésion à l'interface, plusieurs approches ont été étudiées, incluant l'imprégnation des fibres avec des agents bloquant l'absorption d'eau, tels que le silicate de sodium et le sulfure de sodium ou des agents hydrophobe.

Les composites renforcés par des fibres traités ont des valeurs de résistance, de module de Young et d'énergie de rupture plus élevé que celle des composites renforcées par des fibres non traitées. Ceci est dû au traitement des fibres qui élimine les produits nuisibles et indésirables. La lignine qui est relativement rigide et incompatible chimiquement avec le ciment, réduit la surface de liaison entre fibre et matrice. Ceci provoque, par la suite une faible résistance au déchaussement **[138].**

Payratou et al **[155]** ont étudié les modifications physicochimiques des interactions entre les fibres de chanvres et la chaux. Leurs résultats montrent que le traitement avec de la soude améliore la rigidité du mortier par l'élimination des parties amorphes à la surface des fibres ce qui permet d'augmenter le taux de cristallinité des fibres.

Ils observent aussi que le traitement à L'EDTA **(**acide éthylène diamine tétra acétique) augmente la contrainte à la rupture des mortiers réalisé. Ce traitement permet de fixer le minimum de calcium à la surface de fibre. Car la présence de ce dernier en surface influence donc la contrainte à la rupture. On note aussi que le traitement à l'eau chaud contribue à l'amélioration de la rigidité des mortiers.

I.9.3. Influence sur la prise

Dés les années 60, l'ajout du bois au -ciment, augmente sensiblement le temps de prise, voire même une inhibition totale de celle-ci et les mélange reste indéfiniment à l'état pâteux. La détermination des facteurs influençant la prise se posent donc depuis plus de trente ans **[139]**.

Les solutions apportées consiste en l'introduction d'accélérateurs de prise ciment afin de contrecarrer l'effet néfaste des extractibles du bois.

Moslemi **[156]** préconise l'emploi des chlorures de fer, d'étain ou d'aluminium à 5 % en masse. Il est même possible de neutraliser les effets des extractibles à l'aide de chlorure de calcium sans altérer les propriétés mécaniques.

Des influences moins marquées sont attribuées aux tanins et aux acides aliphatiques, tandis que la lignine n'a pas d'effet notable **[138]**.

Wilding et al. **[157]** ont entrepris la classification d'adjuvants organiques et inorganiques selon leur influence, accélératrice ou retardatrice, sur la prise du ciment, en suivant l'hydratation par calorimétrie isotherme. Leurs conclusions semblent indiquer que toutes les molécules organiques induisent des retards, et que parmi elles, les adjuvants phénoliques avec des groupes hydroxyle adjacents sont de puissants retardateurs. D'autres molécules telles que l'acide citrique, le catéchol et l'acide salicylique ont la faculté de former des complexes avec des ions calcium.

Arsene et al. Ont préparé des composites fibres de bagasse/ciment, avec une distribution aléatoire des fibres dans le composite **[158]**. Ils ont étudié l'influence de divers paramètres sur la prise du matériau composite bagasse/ciment la nature des constituants végétaux de la fibre

de bagasse, le traitement thermique de la fibre (bagasse rectifiée entre 175-250°C) ou le traitement chimique d'hydrolyse par l'acide chlorhydrique, le taux massique de fibres de bagasse dans le composite et le pourcentage d'eau ajoutée. Cette étude montre l'effet retardateur de la lignine sur la prise du matériau composite et le comportement du composite devient quasiment le même que celui du ciment classique ou composite cellulose/ciment pour de faibles teneurs en fibres de bagasse rectifiées à 200°C.

En conséquence il semble difficile de maitriser la composition chimique des fibres naturelles (conditions de récolte, lieux de culture …) et donc de contrôler la prise du composite ciment.

I.10. Conclusion

Le présent chapitre a mis l'accent sur le béton , nous avons, dans cette étude bibliographique, passé en revue les points susceptibles de nous guider dans le choix des matériaux à utiliser et dans la définition des essais à effectuer afin de faire progresser notre connaissance dans l'utilisation de ces matériaux en Génie Civil.

Nous avons vu que les bétons renforcés de fibres permettaient d'améliorer, sous certaines réserves, les capacités mécaniques du matériau initial béton.

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

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

Quoique l'Algérie soit parmi les pays qui possèdent une multitude des fibres végétales (fibre de palmier, Alfa Abaca, chanvre de coton …).

Les fibres de palmier dattier est une ressource naturelle renouvelable produit par l'arbre au cours de sa croissance.

L'utilisation des fibres de palmier dattier est 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 médicoéconomique important. De ce fait, de récentes recherches sont en cours dans le but

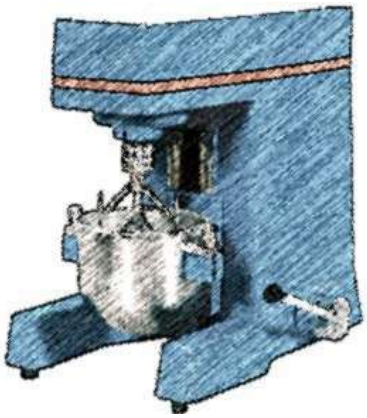
d'améliorer les propriétés des matériaux renforcés par des fibres végétales, de verre ou de polymère.

Les traitements chimiques éliminent les sucres circulants à la surface des fibres et dégradent les hémicelluloses, ce qui permet d'augmenter la rugosité des fibres; cela résulte une amélioration des propriétés mécaniques du composite

Dans cette étude, on s'intéresse à étudier l'influence de l'introduction de fibre palmier dattier sur les propriétés des MAP, puis on va comparer nos résultats avec celui des autres.

chapitre II

Matériaux et essais



II .1. Introduction

Dans cette partie expérimentale, nous proposons une nouvelle démarche pour formuler de mortier autoplaçant fibré. Avant d'entamer une formulation il est nécessaire de connaitre les matériaux et les méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

L'objectif de ce chapitre est déterminer les caractéristique des matériaux utilisées au moyen d'un certain nombre d'essais normalisé, par ailleurs déterminer des dosages optimaux, ainsi que l'illustration des certaines interprétations ne pourraient possible que si les différents constituent sont bien caractérisés.

Pour ce qui concerne notre programme de recherche, préoccupé de valider l'influence de fibre végétale sur le comportement d'un mortier autoplaçant.

Nous procéderons donc dans ce chapitre, successivement à l'identification des matériaux de base utilisées, à la caractérisation des matériaux élaborés et à la présentation des essais et procédure.

Dans ce travail sept types de mortier ont été testés. Il ya plusieurs éprouvette de mortier sont donc confectionnées.

Les différents mélanges sont présentés dans le **tableau II.1**

Tableau II.1 : Différents compositions utilisées dans la recherche

Notation	Désignation	Notation	Désignation
MAP0	mortier autoplaçant de référence (témoin)	**MAP4**	Mortier autoplaçant + fibre traité par NaOH + la cire
MAP1	Mortier autoplaçant + fibre brute	**MAP5**	Mortier autoplaçant + fibre traité par la résine
MAP2	Mortier autoplaçant +fibre traité par la cire	**MAP6**	Mortier autoplaçant + fibre traité par NaOH + la résine
MAP3	Mortier autoplaçant + fibre traité par NaOH		

II.2. Description des matériaux utilisés

II.2.1. Ciment

Le type de ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Mâtine) **(Figure II.1**), est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Lafarge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[160].**



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

Le **tableau II.2** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clincker, selon la fiche technique du ciment **[161].**

Tableau II.2: 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

Voir la fiche technique en « annexe A » pour avoir plus de détaille sur ce ciment

II.2.2. Granulats

On utilise dans cette étude des granulats provenant d'une carrière .ils sont de deux classe granulaire Sable concassé (0/5), sable naturel roulé.

A. Sable concassé (0/5)

Le premier sable utilisé provient de la région de **Mont Guorno** (**Figure II.2**), c'est un sable concassé.

B. Sable naturel roulé

Le deuxième sable utilisé provient de la région de Hassi Bahbah (**Figure II.3**), c'est un sable naturel



Figure II.2: sable roulé



Figure II.3: sable concassé

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 (**Figure II.4)** et commercialisé sous le nom suivant: **MEDAFLOW 145;** Il est à base de polycarboxylates d'ether (PC), sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0, 5% à 2% du poids de ciment **[162] (Annexe B).**



Figure II.4 : MEDAFLOW 145

Ses caractéristiques sont:

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

II.2.5. Fibres végétales

Ce sont des fibres de forme ondulés et rectilignes, Les fibres utilisées dans cette étude proviennent des branchettes de dattes, de l'arbre palmier dattier **(origine : BASAKRA, ALGERIE).**

On prépare les fibres pour obtenir une longueur de 2 cm de longueur, et de diamètre de 2 à 3 mm que nous avons déterminé par l'appareil de pied à coulis **(figure II.5)**



Figure II.5: Les fibres de palmier dattier

Nous avons incorporé ces fibres dans le mortier autoplaçant par addition par rapport au volume du MAP avec des pourcentages de 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %, 2.5 % et 3 % pour chaque type de mortier (MAP 1, MAP2, MAP3 ,MAP4, MAP5 ,MAP6) (**Figure II.6**).



Figure II.6: Différentes types de fibres utilisées

II.2.6. La cire

Les cires, et les paraffines sont largement utilisés dans les composites à base de bois. D'autres additifs comme les élastomères et les plastifiants sont aussi utilisés. Ces produits agissent sur des propriétés spécifiques qui entraînent des modifications de surface permettant d'améliorer d'une manière directe et indirecte la fabrication du composite. Ces modifications contribuent à faciliter le procédé de fabrication (changements des paramètres du procédé : baisse de la température, homogénéisation du mélange, diminution des contraintes mécaniques lors du processus) **[192]**. La figure suivante montre la cire utilisée



Figure II.7: La cire

II.2.7. La résine

La résine utilisée dans ce recherche est **SIKADUR**, **(Figure II.8),** imprégnation époxydique pour reprise de bétonnage, caractérisé de très fort adhérence sur la plupart des supports béton, mortier, pierres, brique, métal …plus, elle a résistance mécanique élevé. (**Annexe c**)



Figure II.8: La résine (sikadur)

II.3. Caractérisation des matériaux

II.3.1. Les essais sur granulats

II.3.1.1. Analyse granulométrique (EN 933-1 et EN 933-2)

A. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituent l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieur ou égale à 63mm, à l'excusions des fillers.

A notre qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. **[165]**

B. Equipement nécessaire

- Série de tamis dont le fond est constitué par un grillage de maillage carré s'étalent entre 0.063 et 125 mm suivant une progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$ = 1.259.
- Machine à tamiser électrique qui imprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses vertical, à la colonne de tamis. **[164]**

C. Description de l'essai

- Peser chaque tamis de la série vide ;
- Emboiter les tamis utilisés les un sur les autres, les dimensions croissant de bas en haut et en plaçant un fond étanche à la partie inférieur afin de récupérer les éléments fins ;
- Placer la pile à tamis sur la machine à tamise ;
- Le matériau étudie est verse en haut de la colonne des piles, mettre le couvercle, et imprimer à l'ensemble une série de secousses ;
- En considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne variant pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse.
- Peser chaque tamis et calculer le refus ce tamis. **[164]**

La **figure II.9** montre les étapes précédentes



Figure II.9: Protocol de l'essai d'analyse granulométrique

D. Expression des résultants

Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisât cumulés, sont présents sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique.

Les résultats de l'essai pour les granulats utilisée sur **la figure (II.9)** sont présents les courbes granulaires (sable 0 /5, sable roulé).

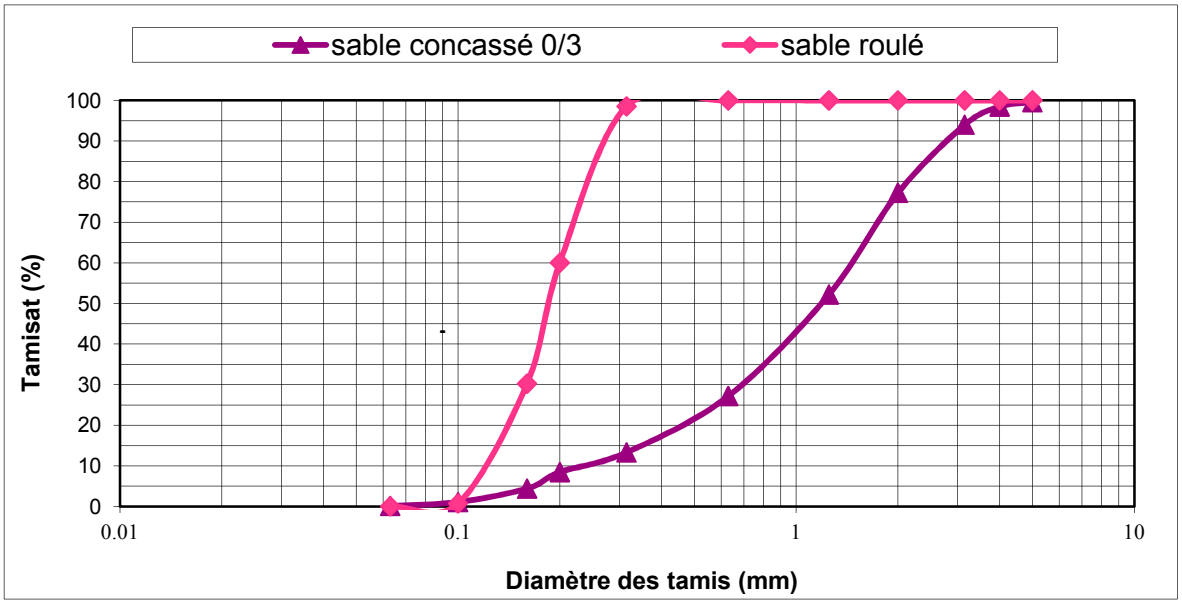


Figure II.10: Analyse granulométrique des sables

II.3.1.2. Masse volumique des granulats

A. Masse volumique apparent (NF P18-555)

A.1. Définition

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

A.2. Conduite de l'essai

- mettre un échantillon de sable dans l'entonnoir ;
- verser le sable dans la mesure en ouvrant l'entonnoir jusqu' à ce qu'il déborde formant un cône ;
- araser à l'aide d'une règle ;
- peser le contenu soit M (en kg). **[164][165]**

La **figure II.11** montre les étapes précédentes



Figure II.11 : Protocol de l'essai de La masse volumique apparente

B. Masse volumique absolue (NF P18-555)

B.1. Définition

La masse volumique absolue ρs est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Il ya deux méthodes pour mesurer la masse volumique absolue :

1-méthode de l'éprouvette graduée ;

2-méthode de la mesure au pycnomètre.

On utilise la deuxième méthode.

B.2. Conduite de l'essai

- Déterminer avec précision la masse M1 du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au niveau du trait repère ;
- Déterminer avec précision la masse M2 d'un échantillon de matériau sec (environ 20g) ;
- Introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre ;
- Remplir d'eau, fermer le bouchon ;
- Amener le niveau de l'eau au niveau du trait repère ;
- Vérifier que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'aire .poser alors le pycnomètre, soit M3. **[167][168]**

La **figure II.12** montre les étapes précédentes



Figure II.12: Protocol de l'essai de La masse volumique absolue

Les résultants sont indique dans le **tableau (II.3)** pour les deux types des granulats

Tableau II.3 : Masse volumique apparent et absolu des granulats

Granulats	Masse volumique absolue kg/m^3	Masse volumique apparente kg/m^3
Sable (0/5)	2702	1459
Sable roulé	2638	1429

II.3.1.3. Coefficient d'absorption d'eau (NF P18-555)

Certain matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures. La porosité est le rapport du volume des vides au volume réel (apparent) de l'échantillon. Le coefficient d'absorption est le rapport de la masse d'eau absorbée par le matériau jusqu'à saturation à la masse de l'échantillon sèche**. [165]**

Les résultants de caractérisation de l'absorption des différents granulats sont récapitulés dans le Tableau II.4.

Tableau II.4 : Résultats de l'absorption

Granulats	Sable 0/5	Sable roulé
Absorption	0.38%	0.02%

II.3.1.4. Module de finesse de sable (NF P 18 -304)

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros. la plasticité du mélange sera insuffisante et tendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui –ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35,38. Ce paramètre est en particulier utilise pour caractériser la finesse des sables à bétons.

La valeur du module de finesse dépend surtout de la teneur en grains fins du sable .les résultants sont indiqués dans le tableau suivant

Tableau II.5 : Module de finesse des granulats

Granulats	Sable (0/5)	Sable roulé	Spécification
Module de finesse MF	3.18	0.72	2.8<MF<3.2 sable grossier 2.2<MF<2.8 sable moyen 1.8<MF<2.2 sable fin

Commentaire

Le sable 0/5 est grossier

Le sable roulé est fin

II.3.1.5. Equivalent de sable (NF P18-598)

A. But l'essai

Cet essai, utilise de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. il s'agit de déceler d'éléments fins dans un sable, et d'en caractériser l'importance par une valeur numérique. Essai simple et rapide, matériel peu fragile aisément réalisable au laboratoire, à la carrier ou au chantier **[164] , [166].**

B. Conduite de l'essai

L'essai s'effectue sur un échantillon de sable humide afin d'éviter les pertes d'argile. Il faut vérifier que les grains de sable ont bien un diamètre inférieur à 5mm par tamisage et vérifier que la masse sèche de l'échantillon soit de 120g.

- Le sable est incorporé dans une éprouvette normalisée et préalablement remplie de solution « lavant ». l'ensemble est agité à la main pour bien humidifier le sable et déloger les bulles d'air. L'humidification dure dix minutes.
- L'éprouvette est ensuite placée horizontalement dans une machine à vibrer automatique. L'éprouvette est vibrée 90 fois en 30 secondes.
- Les éléments argileux floculés sont ensuite remontés à l'aide d'un tube plongeur qui injecte de la solution « lavante ». Les bords supérieurs du tube sont aussi nettoyés pour que l'ensemble de l'échantillon soit plongé dans la solution. Le tube est plongé au fond de l'éprouvette et remonté lentement pendant que l'éprouvette est tournée également lentement. L'argile à floculé et se reparti dans la solution « lavante ». L'éprouvette va reposer durant 20 minutes le temps que tout le floculat argileux se dépose sur le sable brut.
- La limite entre le sable brut et l'argile est maintenant visible. Il est possible de mesurer à l'Œil et au réglé, la hauteur de sable total et la hauteur de sable brut pour en déterminer la proportion, l'E.S
- Il est aussi possible de prendre cette mesure à l'aide d'un piston normalisé qui traverse la couche d'argile pour se poser sur le sable brut. La hauteur totale du sable se mesure comme précédemment. La longueur de la tige du piston correspond à la hauteur de l'éprouvette. La mesure de la longueur de la tige qui n'a pas pénétrée dans l'éprouvette correspond alors à la hauteur de sable brut. **[167]**

La **figure II.13** montre les étapes précédentes

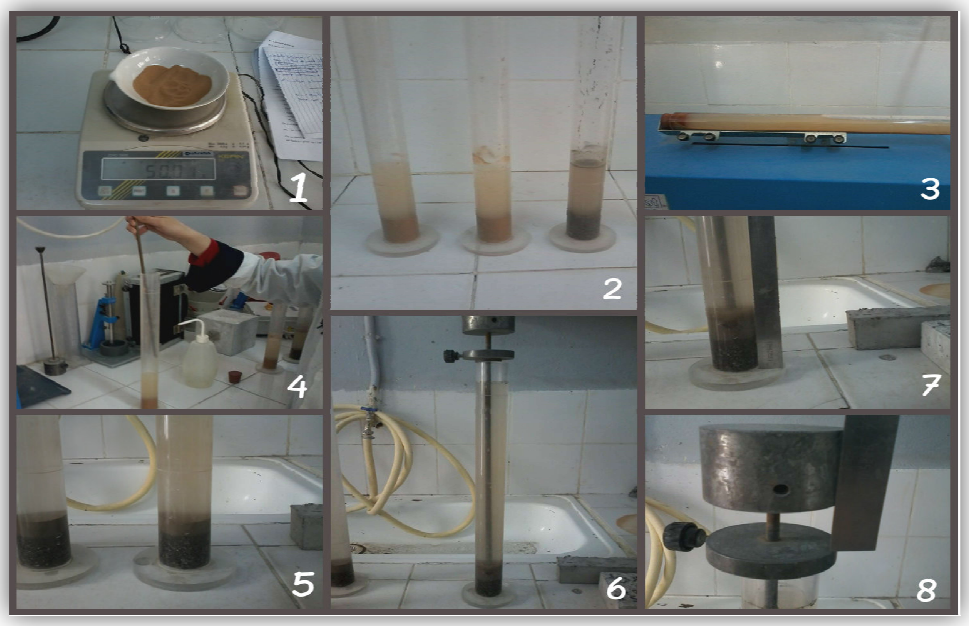


Figure II.13: Protocole de l'essai équivalent de sable

C. Expression des résultants

On calcule, pour chaque éprouvette, ESV et ES avec une précision décimale et on réticent les moyennes arithmétiques, arrondies chacune à l'entier le plus proche.

$$ESV = \frac{h2}{h1} * 100 \qquad ES = \frac{h'2}{h1} * 100$$

L'essai donné les résultats présentés dans le **tableau II.6**

Tableau II.6 : équivalent de sable des granulats

Granulats	ESV %	ES %
Sable (0/5)	97.12%	92.84%
Sable roulé	87.72%	73.22%

Commentaire

Les deux types de sable sont propres

II.3.2. Les essai sur les fibres

II.3.2.1. Masse volumique

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

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

La **figure II.14** montre les étapes précédentes



Figure II.14 : Protocole de l'essai de La masse volumique pour les fibres végétales

Les résultants sont indique dans le **tableau (II.7)** pour chaque type des fibres

FB : fibre brute

FC: fibre traité par la cire

FT: fibre traité par NaOH

FTC : fibre traité par NaOH + la cire

FR : fibre traité par la résine

FTR : fibre traité NaOH + la résine

Tableau II.7: Masse volumique des fibres

Fibres	FB	FC	FT	FTC	FR	FTR
MV ($kg/m^{3)}$	560	710	1085	1052	720	1082

II.3.2.2. Taux d'absorption

Dispositif expérimental Une série d'échantillons a été prélevée dans chacune des plaques de composites afin de mesurer les cinétiques d'absorption d'eau. Le vieillissement choisi est caractérisé par une immersion des échantillons dans de l'eau à température ambiante. Pour suivre la sorption de l'eau dans les composites, la gravimétrie est la méthode généralement utilisée. Elle consiste à suivre l'évolution de masse des échantillons au cours du temps, pendant 24h.

Au moment de la mesure de masse, les échantillons sont sortis du bain et légèrement essuyés à l'aide d'un papier absorbant pour éliminer la pellicule d'eau présente en surface. Les échantillons sont alors pesés.

Après différentes durées d'immersion, les caractéristiques liées à l'absorption d'eau des composites sont déterminées par le pourcentage en masse d'eau absorbée Mt défini par l'équation :

$$Mt = \frac{Mt - M0}{M0.} * 100\ (\%) \qquad \textbf{(Equation II.1)}$$

Où M0 est la masse de l'échantillon non vieilli à t = 0 et Mt est la masse de l'échantillon vieilli à l'instant t (après 24 h).

Figure (II.15) montre les étapes de l'essai Taux d'absorption



Figure II.15: Protocole de l'essai taux d'absorption

Les résultants sont indique dans le **tableau (II.8)** pour chaque type des fibres

Tableau II.8 : Taux d'absorption des fibres

Les fibres	**FN**	**FNC**	**FT**	**FTC**
Taux D'absorption %	**71.06**	**53.38**	**103.91**	**69.00**

II.3.2.3. Modification des fibres végétales

II.3.2.3.1. Traitement chimique des fibres

Dans notre recherche on traité les fibres par une solution de soude.

A. But de traitement

Les fibres traitées provoquent la modification de la structure moléculaire de la cellulose (Rupture des chaines de cellulose) ce qui entrain la chute des propriétés mécanique .

B. Préparation de l'échantillon

Couper les fibres en longueur de 2 cm

C. Conduite de traitement

- Préparer la solution alcaline à partir de la dissolution de 5 g de pastilles d'hydroxyde de sodium NaOH dans 95cm3 d'eau distillée. (Cette solution a donc une concentration de 5%.) ;
- Immerger les fibres dans la solution alcaline pendant 24 h ;
- Laver et rincer les fibres par l'eau distillés pendant 24h ;
- Neutralisation de l'effet de la soude (NAOH) nécessite le rinçage des fibres avec de l'acide acétique durant 10min pour fixé PH à 7 ;
- laver les fibres par l'eau distillés pendant une heure ;
- finalement, sécher les fibres à température 40° C jusqu' à masse constante.

Les figures suivantes montrent tous les étapes de traitement

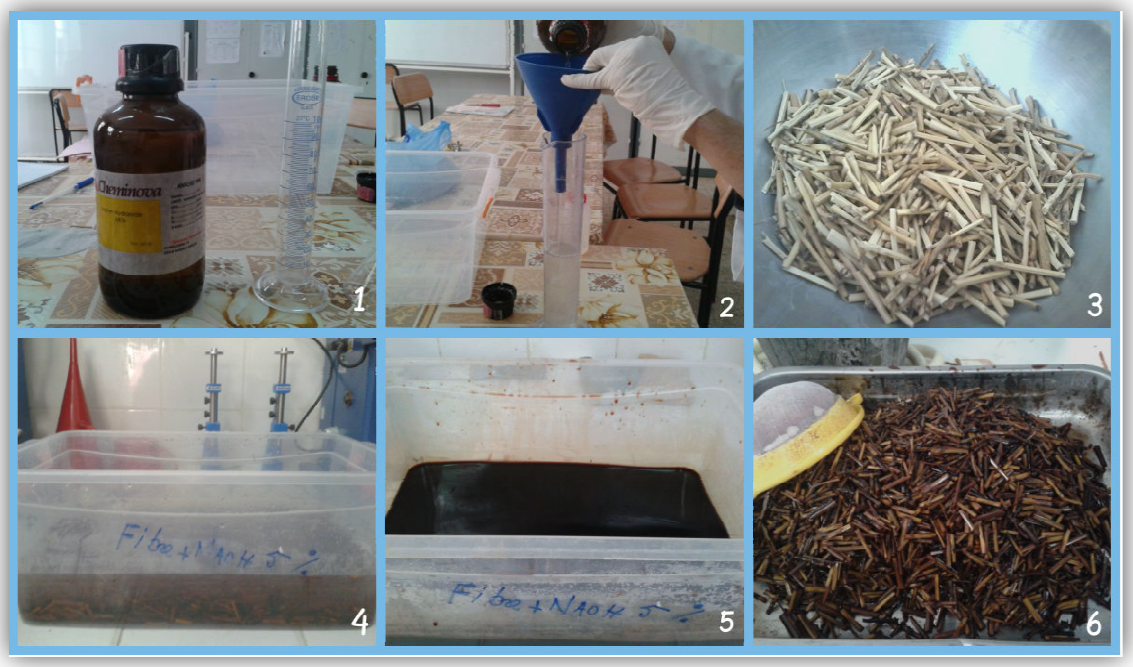


Figure II.16: Protocole de traitement (partie 1)



Figure II.17: Protocole de traitement (partie 2)



Figure II.18: Protocole de traitement (partie 3)



Figure II.19: Le traitement



Figure II.20: Les fibres avant / après le traitement

II.3.2.3.2. Traitement physique

A. traitement des fibres par la cire

A.1. Conduit de l'essai

- Dans un récipient, chauffer la cire jusqu'à son transformation en liquide à une température à peu pris de 50° C
- verser les fibres dans la cire fondue ;
- Sécher les fibres à l'air libre.

La **Figure II.21** illustre les étapes de préparation la cire



Figure II.21: Protocole de traitement par la cire

B. Traitement par la résine

B.1. proportion du mélange

La résine utilisé est fournis sous forme de deux mélange A et B. On va utiliser cette résine, en mélangent ¾ de A et ¼ de B.

B.2. Préparation du mélange

Vider soigneusement la totalité du composant B dans le composant A puis mélanger pendant 3 à 5 min avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation (moins de 300 tours /min) ,muni d'une hélice 3 branches , jusqu'à l'obtention d'une pate homogène tout défaut de mélange peut conduit à une baisse sensible de performance .

B.3. Mise en œuvre

Verser et mélanger les fibres dans la résine pendant 3 min, après utiliser avec le malaxage de mortier.

Les figures suivantes représentent les fibres avec la résine



Figure II.22 : fibres brutes avec la résine



Figure II.23 : fibre traités par NaOH avec la résine

Ces traitements permettent la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur mortier frais et sur mortier durci.

II.3.2.4. Début et fin de prise (Aiguille de Vicat) (EN 196-3)

A. Principe de l'essai

Il consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de ciment en mesurant la profondeur d'enfoncement de l'aiguille de l'appareil dans la pâte ;

B. Equipements utilisés

- Un appareil de Vicat **(figure 24),** équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre. La partie mobile de l'appareil a une masse de 300 g.
- Un moule tronconique de 40 mm de hauteur avec une plaque en verre servant comme support au moule ;
- Une truelle ;
- Une balance ;
- Un chronomètre.

C. Conduite de l'essai

On confectionne une gâchée de pâte de consistance normalisée ; on introduit 400 gr de ciment et 25 à 35 % d'eau, et la conserver aux conditions normales. Le temps (0) est celui où l'eau a fini d'être ajoutée au ciment. Une fois malaxée, la pâte est introduite dans le moule tronconique de l'appareil de Vicat, on amène l'aiguille à la surface de l'échantillon puis on relâche l'aiguille sans vitesse initiale. Après 30 secondes d'attente, on mesure la distance (d) séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base puis note l'heure. On répète l'opération à intervalles de temps espacés et à chaque essai de pénétration, l'aiguille doit être remontée et nettoyée. « - On dit que le début de prise est atteint quand, sous l'effet de la charge de 300 gr, l'aiguille s'arrête à une distance (d) du fond du moule telle que

$d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

Le temps de fin de prise est celui au bout du quel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm



Figure. II.24: l'appareil de Vicat



Figure. II.25: mélange de pâte de ciment



Figure. II.26: mélange de pâte de ciment + les fibres végétales

II.4. Formulation de mortier

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir un mortier avec des propriétés souhaitées.

Notre étude est basée sur l'influence des fibres végétales (palmier dattier) sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques des MAP. Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la formulation OKAMURA (La Méthode Générale) a été développée par Okamura et Ozawa.

Dans notre recherche, nous nous somme basés sur les travaux de SAMANA et DAHMANI **[205],** l'effet de la variation des types des fibres végétales sur les propriétés de MAP.

II.4.1. Optimisation du pourcentage de superplastifiant

L'optimisation du pourcentage de SP consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer des performances meilleures à l'état durci.

Les résultats des essais d'étalement au mini-cône sont présentés dans **le tableau II.9**

Tableau II.9 : Résultats d'étalement sur MPAFV pour différentes % de SP

	MAPFV		
SP %	0.6	0.7	0.8
Etalement (mm)	230	300	300

D'après le tableau ci-dessus on a constaté que plus on augmente le pourcentage du superplastifiant, plus la fluidité augmente, pour un dosage de superplastifiant de 0.60 % par rapport au poids de ciment on a enregistré un étalement de 230 mm, une augmentation du dosage de superplastifiant de 0.10% mène a une augmentation de 70 mm de diamètre, pour un dosage de 0.80% le mortier présente une bonne fluidité mais on a obtenu un mélange hétérogène dont les fibres sont séparées à la matrice et flottent à la surface ce qui provoque de dégradations du mortier à l'état durci pour cela on a proposer deux types de conservations dans l'eau et à l'air libre pour savoir l'effet de la cure sur les caractéristiques mécaniques . **Les figures II.27** jusqu'au **II.29**. Cet essai préliminaire nous a permis de fixer le dosage du superplastifiant de 0.7%.



Figure II.27: Etalement pour SP=0.6%



Figure II.28: Etalement pour SP=0.7% et 0.8%



Figure II.29: Flottement des fibres et dégradation du mortier (Éprouvette conservée dans l'eau)

II.4.2. Les mortiers formulés

Pour récapituler notre travail, on a étudié la formulation des mortiers contenant les fibres végétales avec le rapport sable/mortier S/M=0.45, et le rapport E/C= 0.40, et pourcentage de superplastifiant à 0.7%, pour toutes les compositions. En faisant varier le pourcentage de six types des fibres végétales de 0.5 à 3 % avec un pas de 0.5 % ,de façon à étudier l'effet direct de cette variation.

Les tableaux II (10, 11 et 12) présentent les différentes compositions des mortiers confectionnés, Les différentes proportions ont été calculées selon la procédure donnée en annexe D. Ces mortiers contiennent des volumes fixes en sable, de l'eau, de ciment et de superplastifiant, et des volumes variables des fibres végétales.

Tableau II.10: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier

	MAP0	FIBRE NATURELLE						FIBRE BRUTE + LA CIRE					
		MAP1 0.5%	MAP1 1%	MAP1 1,5%	MAP1 2%	MAP1 2.5%	MAP1 3%	MAP2 0.5%	MAP2 1%	MAP2 1,5%	MAP2 2%	MAP2 2.5%	MAP2 3%
Ciment (kg)	1.993												
Sable 0/5 (kg)	2.122												
Sable roulé (kg)	0.909												
Eau (kg)	0.823												
superplastifiant (kg)	0.014												
Les fibres (kg)	**0**	0.007	0.014	0.021	0.029	0.036	0.043	0.009	0.018	0.027	0.036	0.046	0.055

Tableau II.11: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier

	FIBRE traité par NaOH						FIBRE traité par NaOH + la cire					
	MAP3 0.5%	MAP3 1%	MAP3 1,5%	MAP3 2%	MAP3 2.5%	MAP3 3%	MAP4 0.5%	MAP4 1%	MAP4 1,5%	MAP4 2%	MAP4 2.5%	MAP4 3%
Ciment (kg)	1.993											
Sable 0/5 (kg)	2.122											
Sable roulé (kg)	0.909											
Eau (kg)	0.823											
Superplastifiant (kg)	0.014											
Les fibres (kg)	0.014	0.028	0.042	0.056	0.070	0.084	0.013	0.027	0.041	0.054	0.068	0.082

Tableau II.12: Compositions des différents MAP étudiés dans 2.6 L du mortier

	Fibre brute + la résine						FIBRE traité + la résine					
	MAP5 0.5%	**MAP5 1%**	**MAP5 1,5%**	**MAP5 2%**	**MAP5 2.5%**	**MAP5 3%**	**MAP6 0.5%**	**MAP6 1%**	**MAP6 1,5%**	**MAP6 2%**	**MAP6 2.5%**	**MAP6 3%**
Ciment (kg)	1.993											
Sable 0/5 (kg)	2.122											
Sable roulé (kg)	0.909											
Eau (kg)	0.823											
Superplastifiant (kg)	0.014											
Les fibres (kg)	0.007	0.014	0.021	0.029	0.036	0.043	0.014	0.028	0.042	0.056	0.070	0.084

II.5. Séquence de malaxage

Le mortier autoplaçant de fibres végétales est un matériau composite qui se compose de deux matériaux non homogènes à savoir le mortier et les fibres végétales. Les qualités Fondamentales du mortier de fibres sont largement marquées par divers facteurs tel que:

la composition du mortier, le dosage et les dimensions des fibres, le malaxage, la maniabilité, et la mise en place. **[167]**

Le malaxage et la confection du mortier de fibre sont effectués selon une méthode inspiré de la norme EN-196-1**[170]** en suivant les démarches développées par KRIKER **[180],** qui consiste à imbiber les fibres dans 10% d'eau de gâchage pendant 5 mn ensuite malaxer les agrégats (sable) avec 30 % d'eau de gâchage durant 30 s, par la suite introduire progressivement les fibres humides avec 30 % de l'eau de gâchage et malaxer durant 2 mn afin d'éviter d'une part, l'absorbation brusque d'une très grande quantité d'eau de gâchage ce qui gênerait l'opération de malaxage et d'autre part de faciliter la séparation des fibres, dans le but d'éviter leur regroupement.

Enfin ajouter le ciment et le reste de l'eau en continuant le malaxage durant 2 mn et 30s. L'adjuvant est mélangé au préalable dans la totalité de l'eau de gâchage. **[167]**

La figure II.30 montre Séquence de malaxage



Figure II.30 : Séquence de malaxage du mortier autoplaçant fibré

II.5.1. Préparation et Conservation des Eprouvettes

La préparation des éprouvettes de mortier autoplaçant de fibres est effectuée selon une méthodologie inspirée de la norme EN196-1 **[169].** Après l'opération de malaxage, les moules (40X40X160) mm sont remplis, après la finition, les moules sont conservés dans les conditions du laboratoire durant 24 h, après, on effectuera l'opération de démoulage. Et

On les place dans un bac de conservation à une température d'environ 20°C et à l'air libre jusqu'à l'échéance de l'essai

Cette procédure est décrite dans **les figures II.31 ,32** et **33**



Figure II.31 : Les moules



Figure II.32 : Préparations des éprouvettes



Figure II.33 : Conservation des éprouvettes

II.6. Les essais sur les mortiers

II.6.1. Etat frais

Dans cette étude, deux essais on été effectues pour valider le caractère autoplaçant des mortiers formulés

II.6.1.1. Essais d'étalement au mini-cône

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

A. Matériel nécessaire

- Plaque métallique plane constituant un carré d'au moins 90 cm de côté ;
- mini Cône disposant d'un empattement à sa partie basse afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur ;
- 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 mini cône sur la plaque ;

- Remplir le mini cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône;
- Soulever le mini cône verticalement à l'aide des deux poignées ;
- Une fois que le mortier 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 mortier (comme présence d'une épaisseur de laitance en périphérie de la galette et accumulation de gravier au centre d'une galette de mortier).

La **figure II.34** montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône



Figure II.34 : Protocole de l'essai d'étalement

II.6.1.2. Essai d'entonnoir en V (V-funnel)

L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesuré. Ce temps mesuré indique la fluidité et caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif.

A. Matériel nécessaire

- Entonnoir en V (V-funnel)
- Chronomètre ;
- Un seau.

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 mortier ;
- Remplir l'entonnoir avec le mortier ;
- 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 déclenchant 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 TVF;
- Refaire l'essai 3 fois ;
- Le résultat est la moyenne des trois valeurs du temps d'écoulement obtenues.

La figure II.35 montre les étapes de l'essai



Figure II.35: Protocole de l'essai d'entonnoir (V-Funnel)

II.6.2. Etat durci

II.6.2.1. Essai de traction par flexion

Sept types de mortier contenant trente-trois spécimens prismatiques, de 40 par 40 par 160 mm, ont été coulés pour chaque mélange de mortier pour essais de flexion 3 points, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20 ° C (EN 12390-2).La résistance à la flexion a été évaluée selon la norme (EN 196-1) sur des éprouvettes prismatiques par le calcul de la contrainte de traction maximale atteinte au fond de la section transversale du milieu de l'échantillon testé. Le module de rupture (MOR) a été obtenu comme suit:

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

Où L est la charge maximale appliquée (N), d est la distance entre les supports (120 mm), et «e» est la dimension de la section carrée (40 mm).

Figure II.36 : montre les étapes de l'essai de traction



Figure II.36 : Protocole de l'essai de traction

II.6.2.2. Essai de compression

La résistance en compression a été mesurée par compression axiale d'éprouvettes cubiques de dimensions (40×40×40) mm3, à 3, 7et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000. La résistance en compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai.

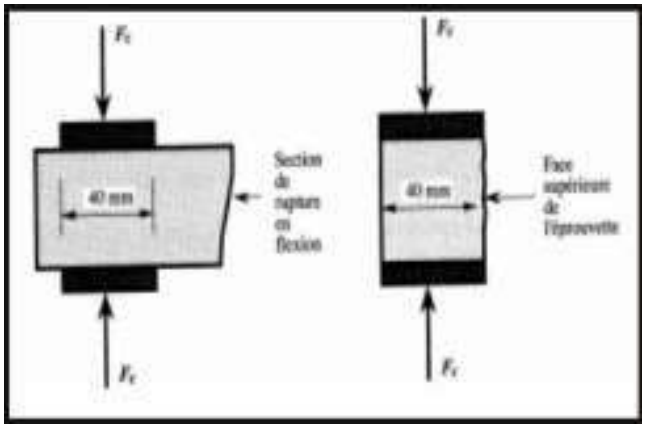




Figure II.37 : Presse hydraulique (2000 kN)

Si Fc est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra : $\sigma c = \frac{Fc}{a^2}$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si Fc est exprimée en newtons, cette résistance exprimée en méga pascals vaut :

$fc28\ (MPa) = \frac{F\,c}{1600}\ (N)$

Figure II.38 : montre les étapes de l'essai de compression



Figure II.38 : Protocole de l'essai de compression

II.6.2.3. Retrait et gonflement

A. Objectif de l'essai

Il consiste à évaluer le retrait axial, ou le gonflement des éprouvettes (40 x 40x 160) mm³ des 7 mélanges ainsi que leur perte en poids.

B. Equipement utilisé

Il est recommandé dans la norme NF P 15-433.

- Une salle dont la température est maintenue à 25 à 30°C
- Un bain d'eau dont la température est maintenu à 25 à 30°C
- Un malaxeur normalisé.
- Une balance.
- Des moules de dimensions (40 x 40 x 160) mm³ sont équipés de plots de retrait en laiton.

Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier, puis dévissés du moule avant le démoulage. Après durcissement, les éprouvettes (40 x 40 x 160) mm³ sont donc munis à leurs extrémités de plots.

Ensuite, les éprouvettes ont été conservées dans une salle régulée 25 à 30°C

- Un rétractométre digital équipé d'un comparateur électronique. Une tige en invar permet l'étalonnage de l'appareil grâce à deux billes solidaires à tige distantes de L= 200 mm (**Figure II.39)**
- 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. **[176]**



Figure II.39 : Le réctractomètre

C. Principe de l'essai

On compare les mesures de valeurs initiales (de référence) qui sont faites à 24 heures au moment du démoulage, à différents temps (t) chaque 24 h, la variation de longueur d'une éprouvette (40 x 40 x 160) mm³, par rapport à sa longueur à un temps (t0) pris pour origine.

Le principe de lecture, le comparateur est mis à zéro sur la tige étalon en Invar de longueur L = 200 mm. Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps (t) ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré **l = L + dl(t).**

Soit l(t0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi pour origine. En général cette origine est pri au éprouvettes. La variation de longueur au temps (t) sera

Δl(t) = l(t) – l(t0) = dl(t) – dl(t0).

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

$$\varepsilon(t)=\frac{\Delta l(t)}{L}=\frac{dl(t)-dl(t0)}{L}$$

Δl(t) est obtenu en faisant la moyenne entre les trois éprouvettes issues du même moule.

Lorsque les éprouvettes en mortier 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, alors c'est le gonflement. **[176]**

Cette procédure est décrite dans **les figures II.40**, **II 41**



Figure II.40: Protocole de l'essai de retrait



Figure II.41 : Protocole de l'essai de gonflement

II.6.2.4. Absorption d'eau par capillarité

A. Objectif de l'essai

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable,

Tel est le cas des mortiers, qui grâce à leur capacité d'absorption d'eau, peut engendrer des dommages internes au béton si celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures ou des milieux très humides.

Le béton aussi est un matériau poreux, qui a cette capacité d'absorption d'eau et qui peut nuire à sa durabilité si cette caractéristique est assez importante.

Dans cette étude, comme on a mesuré l'absorption capillaire d'eau, il convient d'opter sur un échantillon sec.

L'absorption capillaire est mesurée suivant le projet de norme européenne EN 480-5. Les éprouvettes de mortier (40 x 40 x 160) mm³, démoulés à vingt-quatre heures, sont conservées pendant vingt huit jours, ils sont placés dans le sens vertical, leur base inférieure étant immergée sur une hauteur de 5 mm dans l'eau.

Le but recherché est de mettre en évidence l'influence éventuelle de la nature et la teneur des fibres sur l'absorption capillaire. Donc, dans cet essai, on déterminer justement la grandeur de cette capacité d'absorption d'eau pour les différents mélanges et de distinguer les paramètres influents sur cette caractéristique**. [172]**

B. Equipement nécessaire

- Une salle dont la température est maintenue à 25 à 30°C
- Un bain d'eau dont la température est maintenu à (20°C).
- Balance.
- Séchoir.

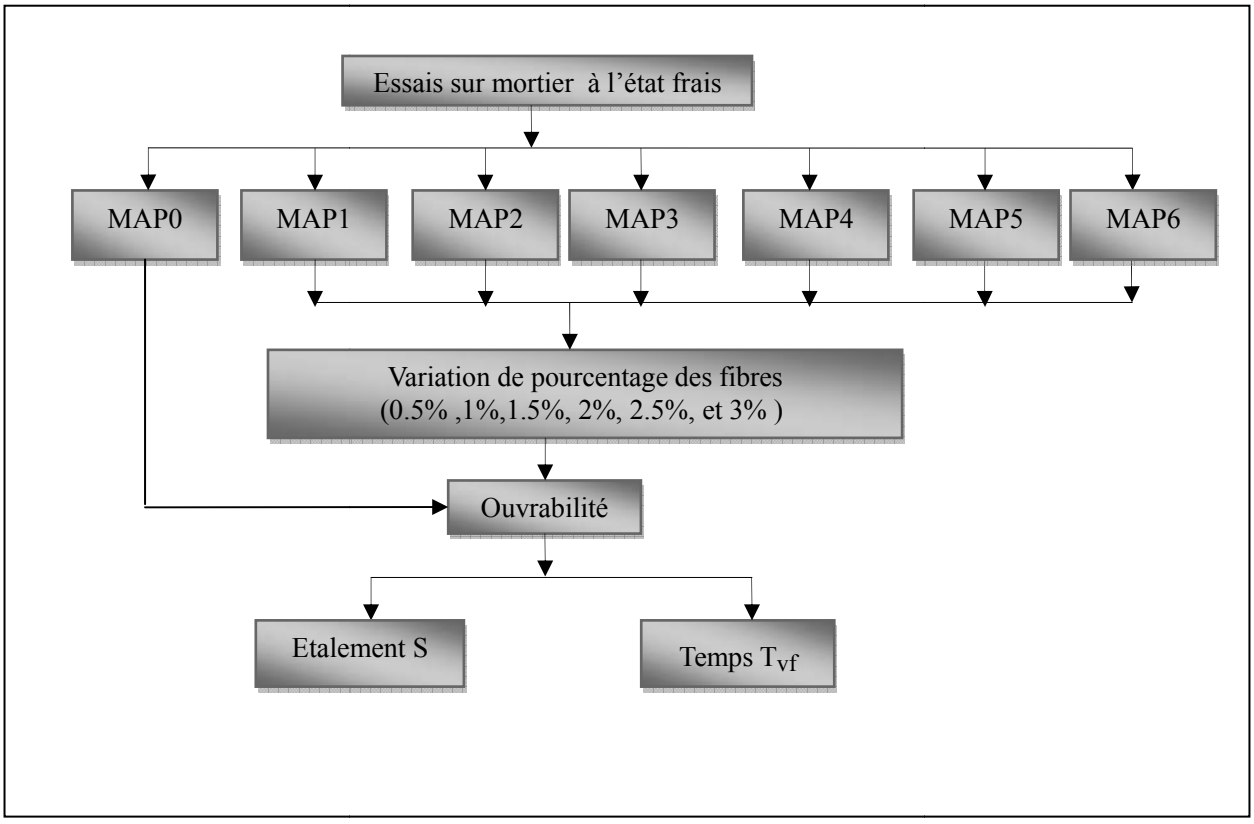
C. Principe de l'essai

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 0.5 cm d'eau **(Figure II.42),** 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) **[179]**.



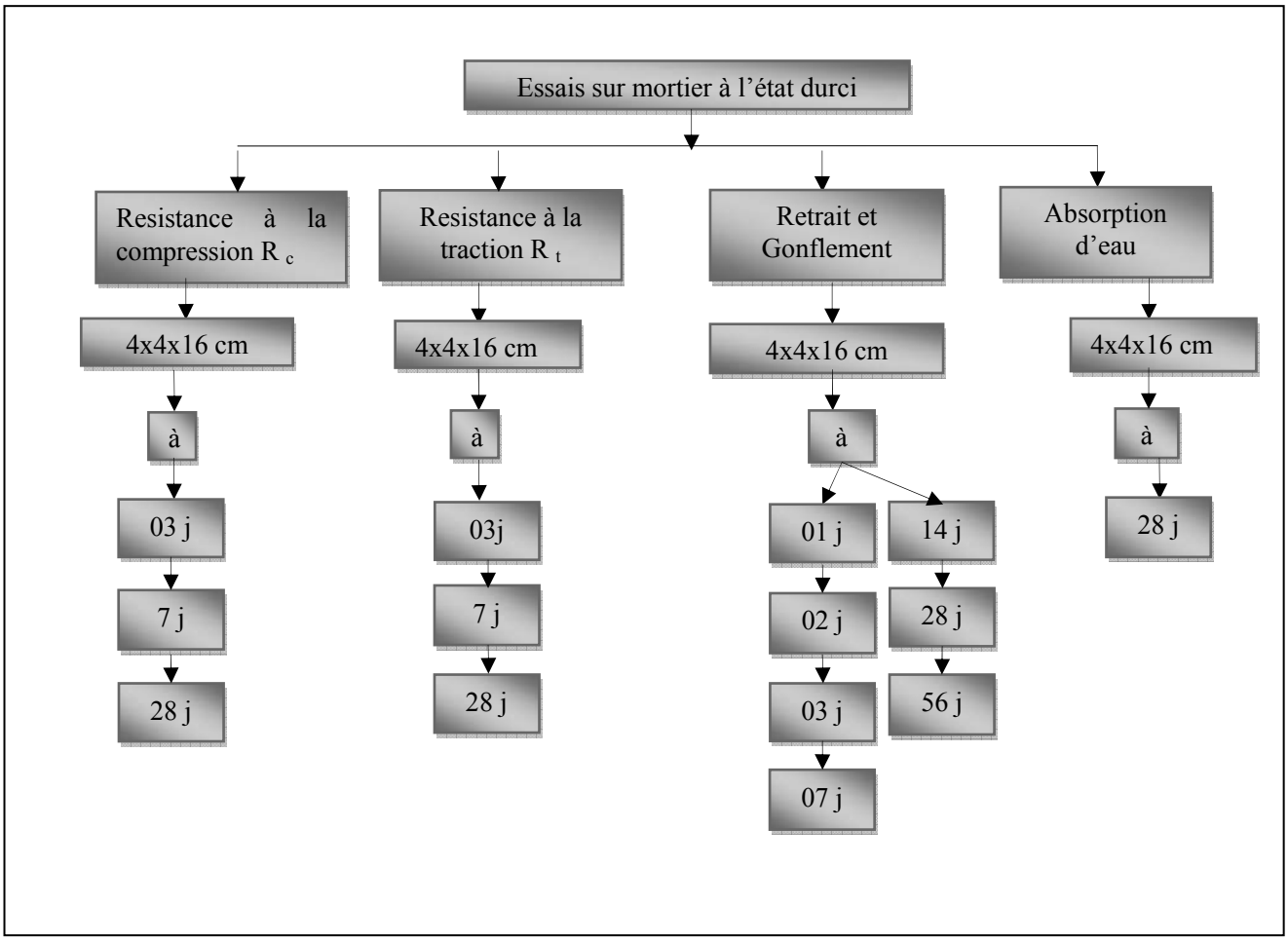
Figure II.42: Protocole de l'essai d'absorption d'eau

II.6.3. Récapitulation des essais faits à l'état frais



Organigramme II.1: Essais à l'état frais

II.6.4. Récapitulation des essais faits à l'état durci



Organigramme II.2 : Essais à l'état durci

II.7. Conclusion

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

Le nombre d'essais qui a été effectué dans le cadre de cette thèse était important, Pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (essais d'étalement au mini cône, d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel)). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (compression, traction, absorption d'eau, retrait et gonflement). Pour reconnaitre l'effet des fibres végétales sur le mortier autoplaçant que se soit à l'état frais ou durci.

Dans le chapitre suivant, On a exposé les résultats obtenus par les différents essais sur le mortier et ainsi suivis par d'interprétations et comparaisons avec ceux que obtenus par la littérature.

Chapitre III

Résultats et interprétations



III.1. Introduction

Pour les mortiers renforcés de fibres, le maximum de la fraction volumique et du type de fibres est déterminée par les propriétés mécaniques souhaitées. Toutefois, pour les mortiers autoplaçants, il est nécessaire d'assurer une bonne fluidité et une bonne résistance à la ségrégation. **[176].**

III. 2. Mortier frais

III. 2.1. Temps de prise

Un appareil d'essai Vicat est utilisé afin de déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes de ciment contenant des fibres.

Le test de Vicat est réalisé sur des mélanges eau/ciment/fibres ; dans ce cas, le pourcentage massique de fibres de Palmier dattier est de 2%, et le rapport massique Eau/Ciment est de 0,35.

Le **Tableau III.1** présente les résultats de l'essai de Vicat; on remarque que l'introduction des fibres brutes dans la pâte de ciment retarde le début de prise d'environ 80 minutes.

Tableau III. 1: Résultats de l'essai Vicat

Temps de prise / Mélanges	Début (min)	Fin (min)
Ciment / eau	330	360
Ciment /eau /fibres brutes	410	510
Ciment /eau /fibres traitées par NaOH	338	372
Ciment /eau /fibres brutes +Cire	380	497
Ciment /eau /fibres brutes +Résine	372	383
Ciment /eau /fibres traitées par NaOH+Cire	335	370
Ciment /eau /fibres traitées par NaOH+ Résine	332	363

La durée totale de la prise est changée avec intervalle de 80 min. Une petite masse de fibre brute suffit donc à retarder le temps de prise ; L'hémicellulose et les sucres contenus dans les fibres brutes sont en parties responsables des ces retard de prise.

On a enregistré aussi que le début de prise de mélange avec les fibres traitées par NaOH est retardé seulement par 8 min. Cette amélioration est due au traitement chimique par la soude qui a éliminé les sucres. Des résultats semblables ont été présents dans la littérature. **[138]**

Pour obtenir un mortier autoplaçant renforce de fibres, on a procédé d'incorporer les fibres végétales pour différentes fractions volumiques. Tout en assurant la fluidité, la capacité de passage, de remplissage et la résistance à la ségrégation recommandée par EFNARC **[177],**

Tableau III.2 : Résultats obtenus sur les MAPFV étudiés à l'état frais

Type de mortier		D (mm)	V-funnel (sec)	Type de mortier		D (mm)	V-funnel (sec)
MAP0	0%	302	2.09	MAP4	0.5%	300	2.9
MAP1	0.5%	290	3.28		1%	291	3.36
	1%	280	3.96		1.5%	287	3.62
	1.5%	275	4.39		2%	285	3.73
	2%	269	4.7		2.5%	277	3.99
	2.5%	260	5.28		3%	*	/
	3%	253	5.63				
MAP2	0.5%	292	3.32	MAP5	0.5%	300	2.56
	1%	287	3.52		1%	295	3.1
	1.5%	280	3.83		1.5%	290	3.23
	2%	275	3.99		2%	285	3.53
	2.5%	265	4.26		2.5%	280	3.74
	3%	260	4.58		3%	270	3.91
MAP3	0.5%	290	3.63	MAP6	0.5%	301	2.19
	1%	281	3.87		1%	297	2.29
	1.5%	275	4.5		1.5%	295	2.76
	2%	263	5.22		2%	290	3.26
	2.5%	*	/		2.5%	280	3.46
	3%	*	/		3%	270	3.58

(*) : Déformation (/) : Blocage

III. 2.2. Effet des fibres végétales sur l'étalement

Les résultats ont révélé que les diamètres d'étalement de tous les mélanges sont situés entre 253 et 270mm, alors que les diamètres recommandés Nawa et al **[178]**, par sont entre 250 et 280. Quand à Chai **[179]**, 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 **[179]**.

La **Figure III.1** montre l'effet du pourcentage des fibres sur l'étalement des MAP. On note que les valeurs d'étalement, pour les mélanges des mortiers à base de fibres traitées par NaOH+Résine sont moins affectées que les mélanges confectionnés avec des fibres brutes.

L'observation des résultats montre que la plus grande valeur de l'étalement est celle de MAPT avec 302 mm de diamètre, et le plus petit est celle du mélange qui contient des fibres brutes de 3.00% comme fraction volumique, On note aussi que certains mortiers fibrés sont bloquées avant le pourcentage maximum, c'est le cas des mortiers a base de fibres traités par NaOH bloqué au 2% et une ségrégation et accumulation des fibres au centre de la galette pour les mortiers à base de fibres traités par NaOH+cire pour une fraction volumique de 2.5%

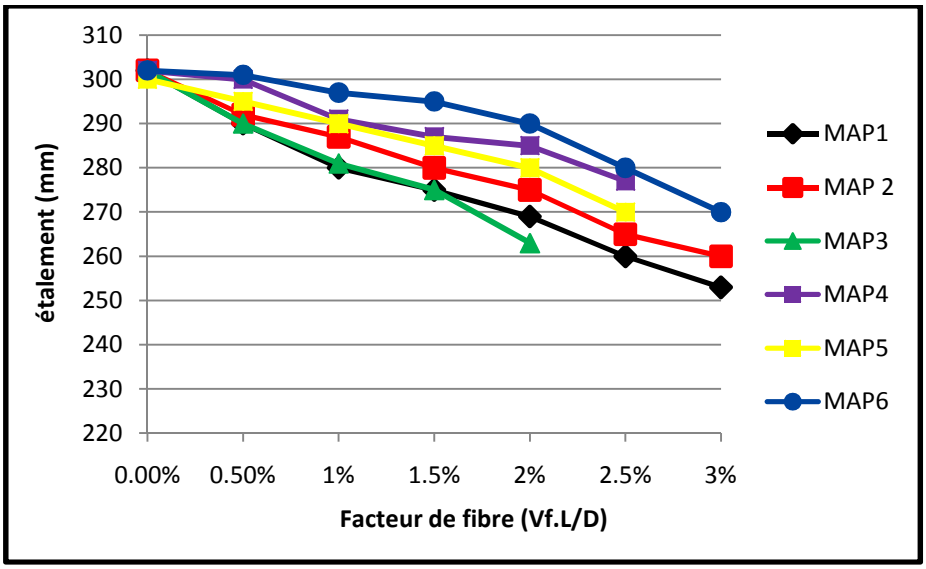


Figure III.1 : L'étalement en fonction de facteur de fibre



Figure III.2 : étalement homogène



Figure III.3 : étalement non homogène (ségrégation)



Figure III.4: étalement n'est pas circulaire

L'écoulement des MAP fibrés est affecté par l'introduction des fibres, plus on augmente le pourcentage et des fibres plus l'écoulement diminue **[181], [180], [182]** et **[183]**. Deux observations indiquent que l'écoulement n'est pas homogène, un étalement n'est pas circulaire, cela veut dire que l'écoulement est contracté selon une ou plusieurs directions et une concentration des fibres et des agrégats au centre de la galette déformée après la réalisation de l'essais à travers un cône d'Abrams **[180] (figure III.3) (Figure III.4)** .Westerholm et El-Dieb **[185]** et **[186]** ont mesuré une baisse de la fluidité avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres, ce phénomène est dû aux perturbations causées par les fibres sur la compacité totale du système.

III. 3.3. Le temps d'écoulement à travers le V-funnel

L'entonnoir permet la mesure de la vitesse de déformation du béton fluide. La **Figure III.5** montre l'effet des fibres sur le temps d'écoulement à travers l'entonnoir des mélanges. Plus les fibres sont ajoutées, plus le temps d'écoulement est augmenté.

Le meilleur temps de l'écoulement était 2.09 s mesuré pour le MAPT, tandis que le MAP1 de 3.00 % a eu le temps d'écoulement le plus haut de 5.63 s. Les valeurs proposées sont de l'ordre de 2 à 10 s. Les valeurs obtenues à travers ces tests sont acceptables pour tous les mélanges.

La **Figure III.5** montrent l'effet du pourcentage des fibres sur le temps d'écoulement des MAP à travers le V-funnel, d'une part, plus on augmente le pourcentage des fibres plus le temps d'écoulement augmente converge plus rapidement vers le seuil supérieur **[183]**, cette convergence du temps vers le seuil revendique des signes de ségrégations et hétérogénéité des mélanges,

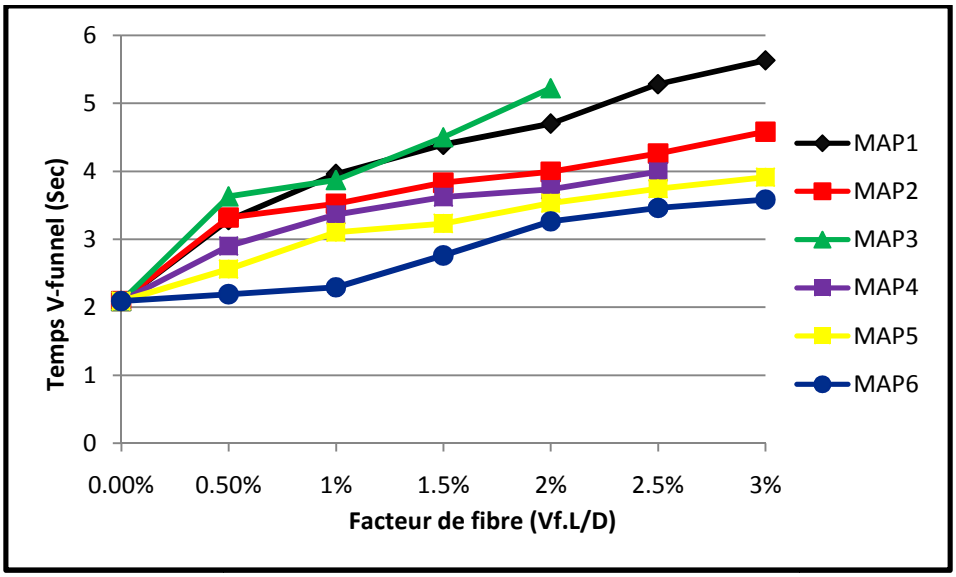
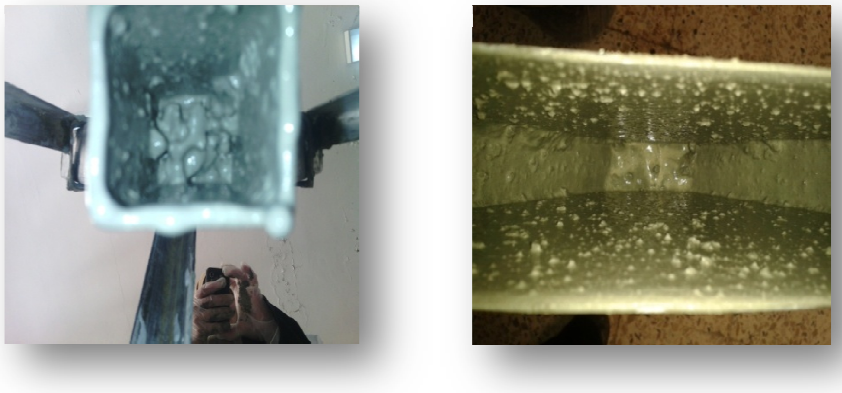


Figure III.5: Temps (V-funnel) en fonction du pourcentage des fibres

D'autre part, on a constaté la formation d'oursins (i.e. amas de fibres entremêlées) est évoluée **[184]**, cette évolution perturbe l'écoulement et par conséquence l'augmentation de la viscosité provoque d'éventuelles ségrégations et blocage **[182]**.le cas du mortier renforcé par des fibres traités par NaOH avec un pourcentage de 2.5% et fibres traités par NaOH + la cire avec un pourcentage de 3%. **Figure III.6**



a : (V-funnel) vue de dessous b: (V-funnel) vue de dessus

Figure III.6: Cas de blocage

III. 2.4. Teneur maximale en fibres végétales

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

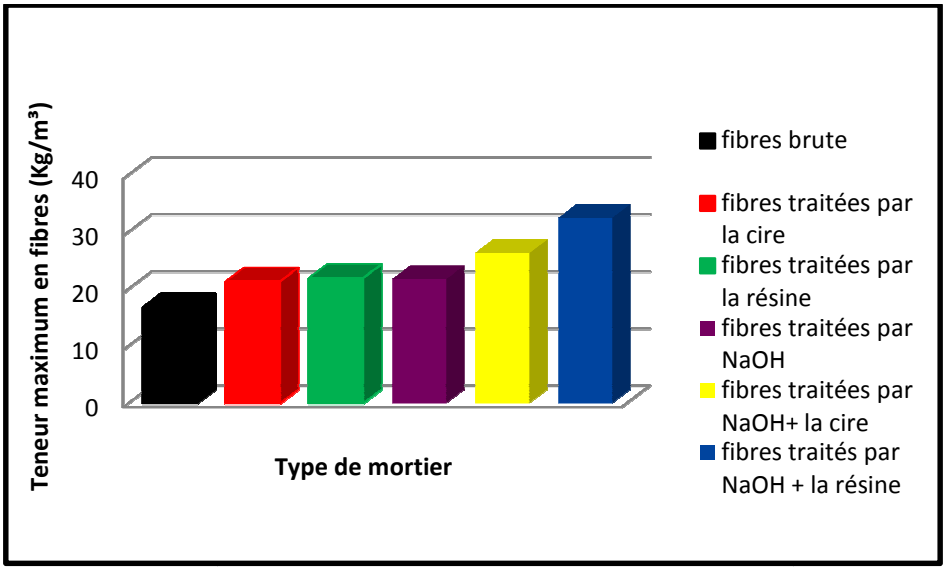


Figure III.7 : Teneur maximum en fibres

A travers les résultats obtenus, les mortiers autoplaçants, renforces des fibres végétales qui répond aux recommandations NAWA ET AL **[178]** sont visés pour l'étude des caractéristiques mécaniques à l'état durci.

Tableau III.3 : pourcentage de fibres végétales toléré pour la réalisation des différents types de MAP

Type de MAP	Pourcentage a fibre toléré (%)
MAP (sans fibre)	0
MAP+ fibre brute	3
MAP+ fibre traité par la cire	3
MAP+ fibre traité par la résine	3
MAP+ fibre traité par NaOH	2
MAP+ fibre traité par NaOH + la cire	2.5
MAP + fibre traité NaOH + la résine	3

III.3. Essais sur un mortier durci

III.3.1. Résistance à la compression

Sept types de mortier contenant trente-quatre échantillons de (40*40*160) mm³ de dimensions, ont été coulés pour chaque mélange de mortier pour les essais de compression, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier et ils sont conservé dans l'eau à 20 ° C (EN 12390-2) et à l'air libre.

a. Conservation à l'air libre (mode ambiant)

Les résultats obtenus pour les mortiers autoplaçant conservés à l'air libre à partir du test de résistance à la compression à 3, 7, et 28 jours, et avec différentes fractions volumiques de fibres sont donnés aux **figures III.8** jusqu'au **III.13**. On a constaté que la résistance à la compression est augmenté de **41.36%** pour une addition des fibres traitées pars NaOH+résine de **3.00%** comme fraction volumique. Ce constat est aussi enregistré pour le MAP3 où on a obtenu une amélioration de la résistance de **10.01 %.** D'autre part pour les mortiers MAP1, MAP2, MAP4 et MAP5 on a enregistré des optimums au delà des pourcentages donnés on a obtenu des chutes de résistances. La résistance a été améliorée de **1.87%,7.86%,13.02%,** et **13.65 %** pour les fractions volumiques de **1.50%, 2.00%, 2.00%** et **2.50%** respectivement,

puis des chûtes de résistances de **13.02%,18.09% ,9.96 %** et **9.23%** par rapport à la valeur maximum obtenu.

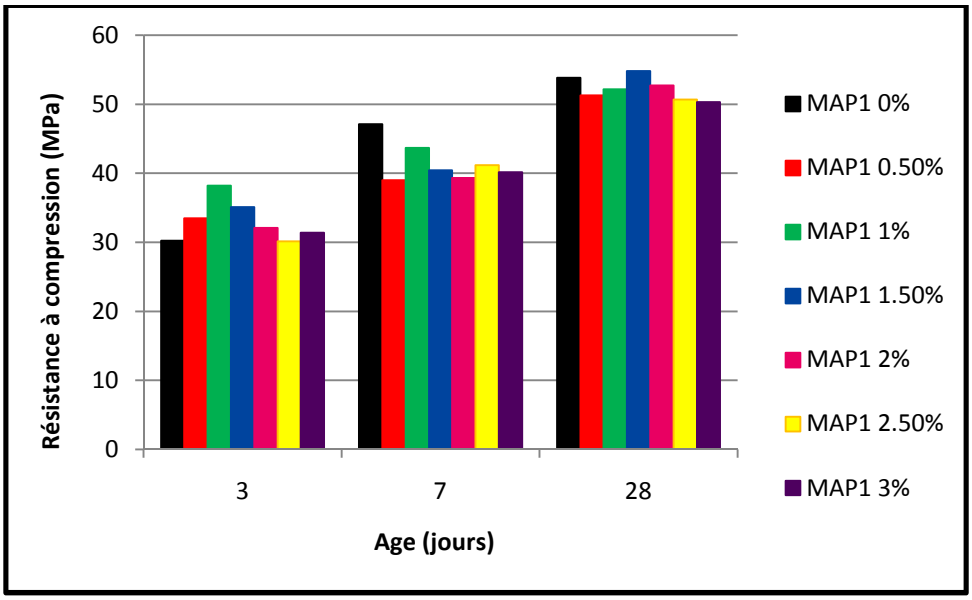


Figure III.8: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP1

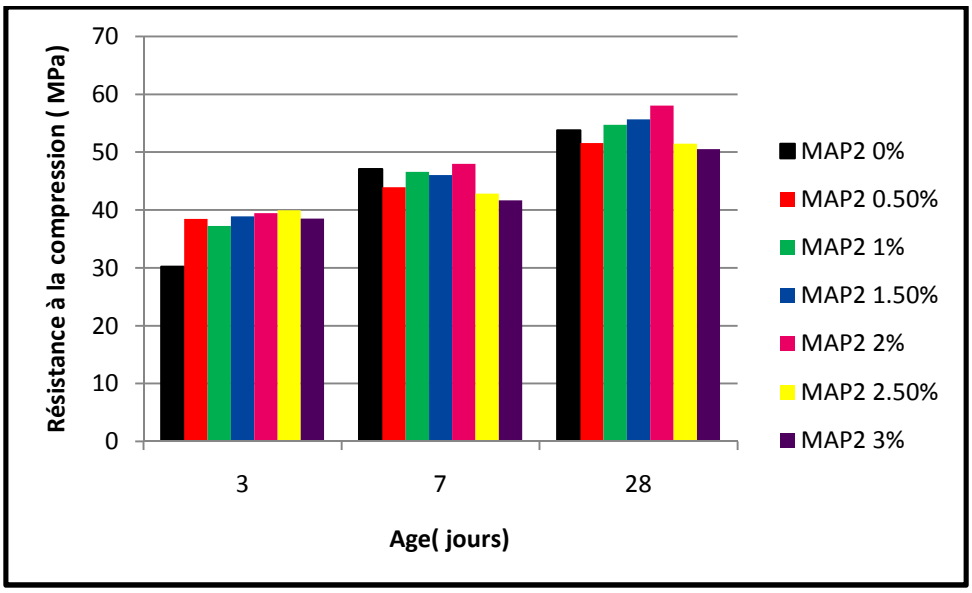


Figure III.9: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP2

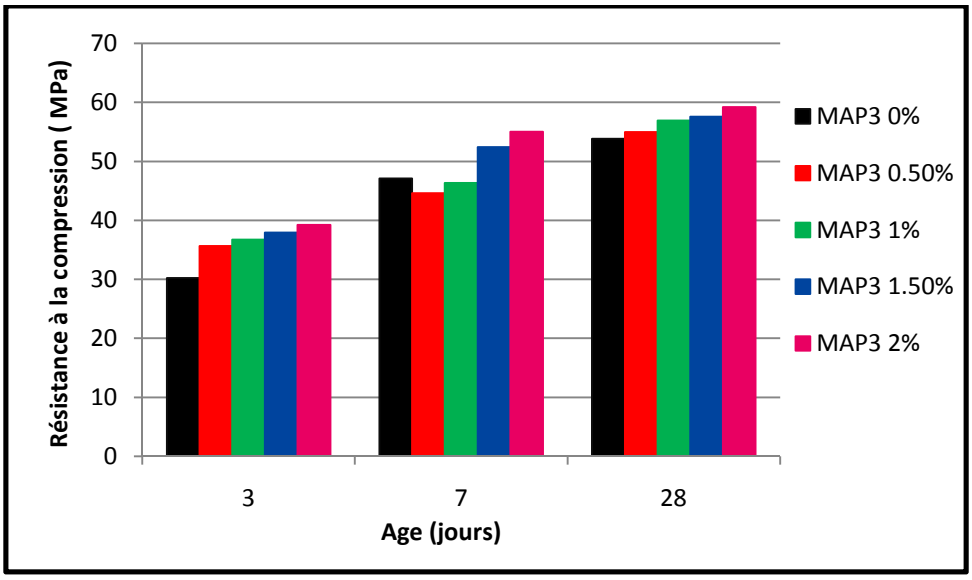


Figure III.10: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP3

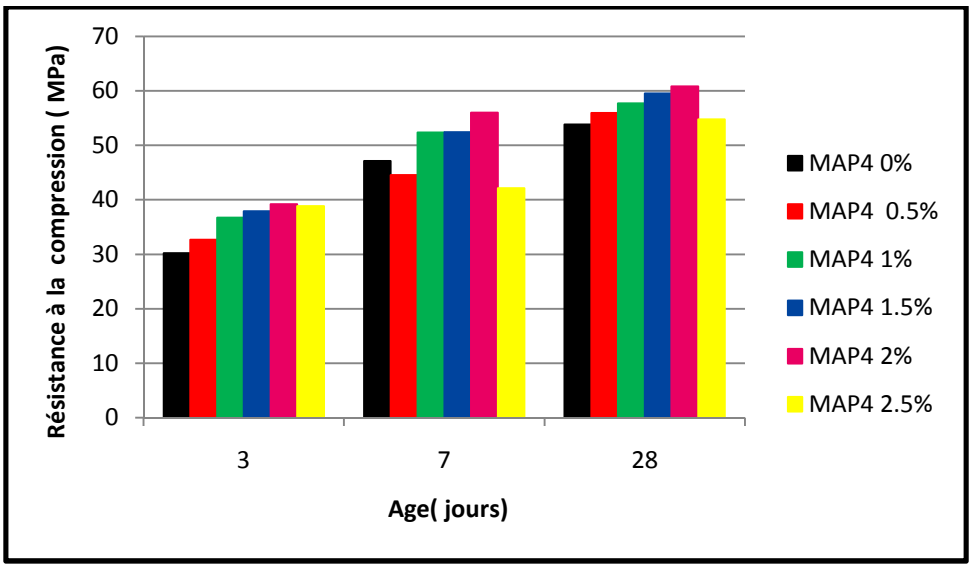


Figure III.11: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP4

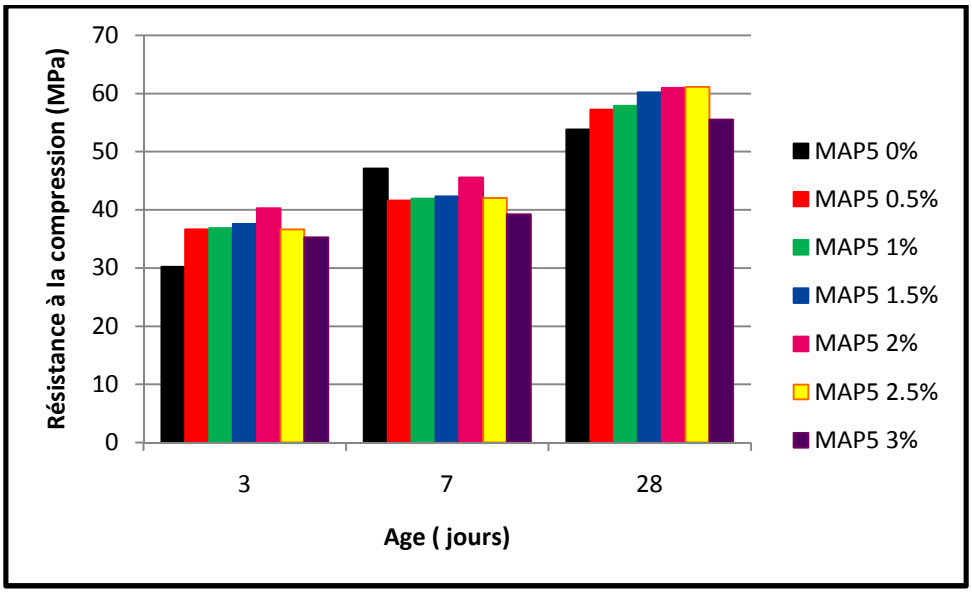


Figure III.12: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP5

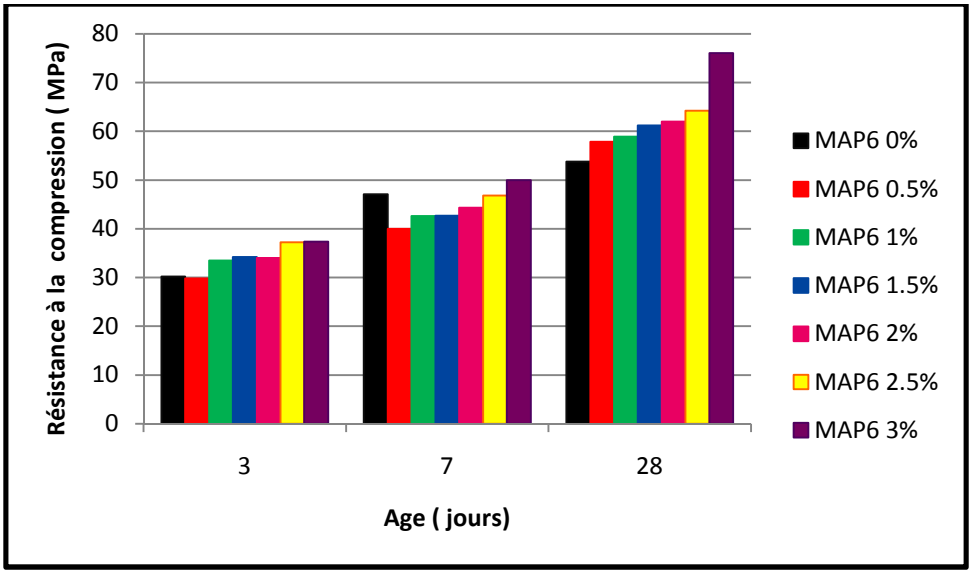


Figure III.13: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP6

b. Conservation dans l'eau (mode saturé)

Les résultats obtenus pour les mortiers autoplaçants conservés dans l'eau (mode saturé) à partir du test de résistance à la compression à 3, 7, et 28 jours, et avec différentes fractions volumiques de fibres sont donnés aux **figures III.14** jusqu'au **III.17**. On a constaté que la résistance à la compression est augmenté de **7.86 %** pour une addition des fibres traitées pars NaOH+la cire de **2%** comme fraction volumique. D'autre part pour les mortiers MAP1, MAP2 et MAP3 on a enregistré des optimums au delà des pourcentages donnés on a obtenu des chutes de résistances. La résistance a été améliorée de **2.06%, 3.79%** et **7.26%** pour les fractions volumiques de **0.50%, 1.00%** et **1.50%** respectivement, puis de chute de résistances de **32.84%, 32.05 %** et **4.76 %** par rapport à la valeur maximum obtenu.

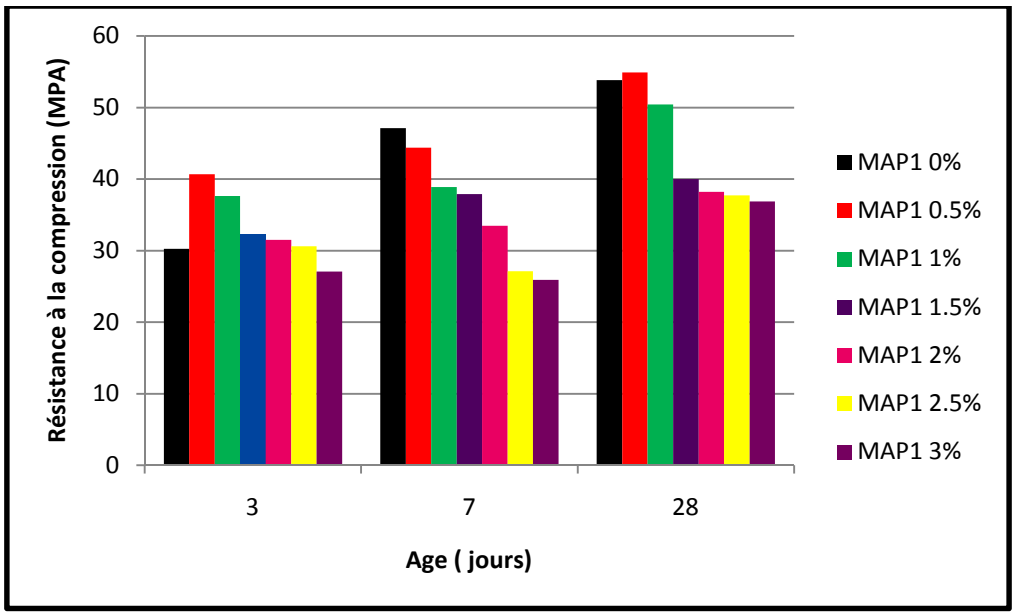


Figure III.14: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP1

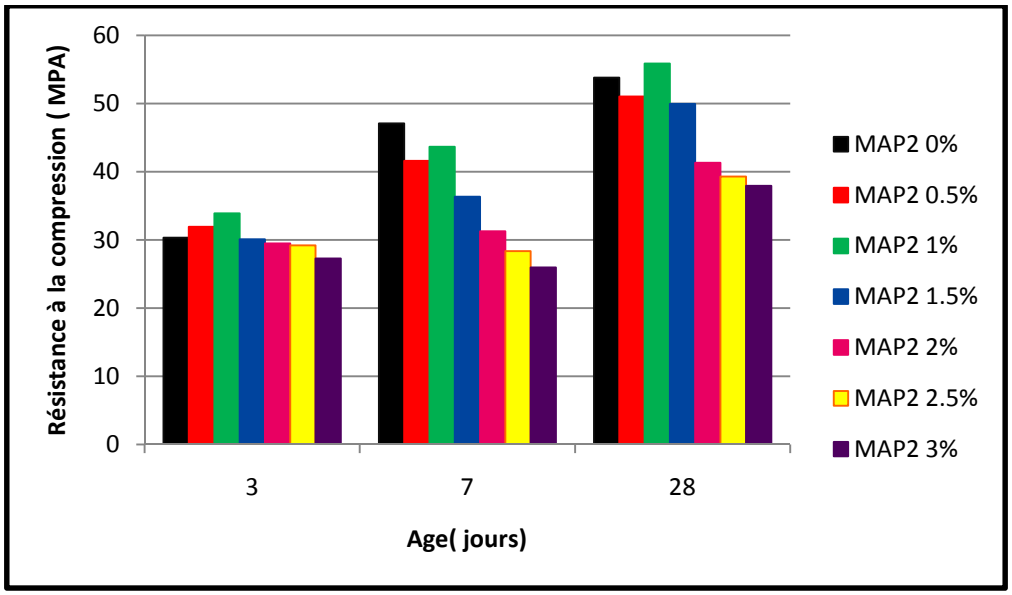


Figure III.15: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP2

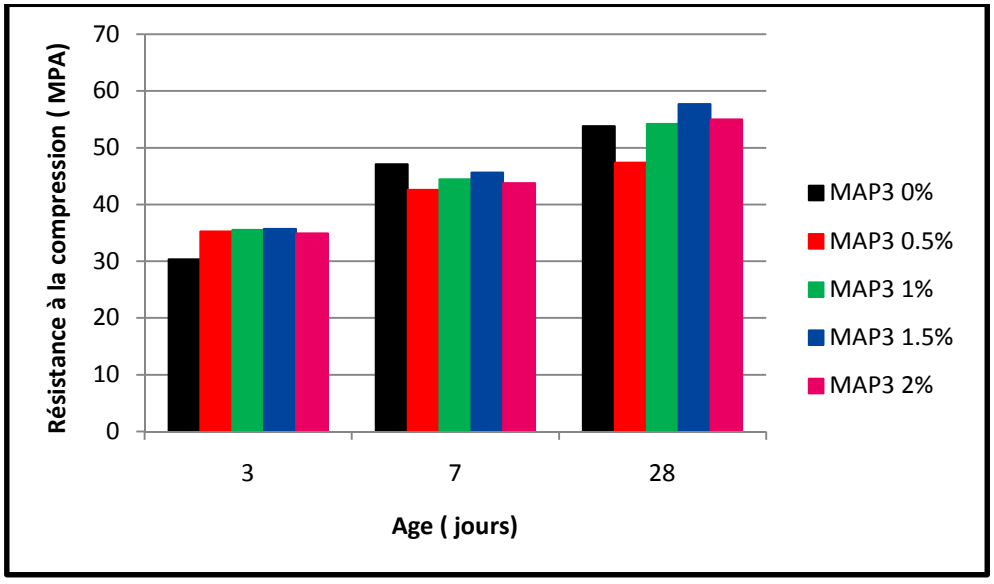


Figure III.16: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP3

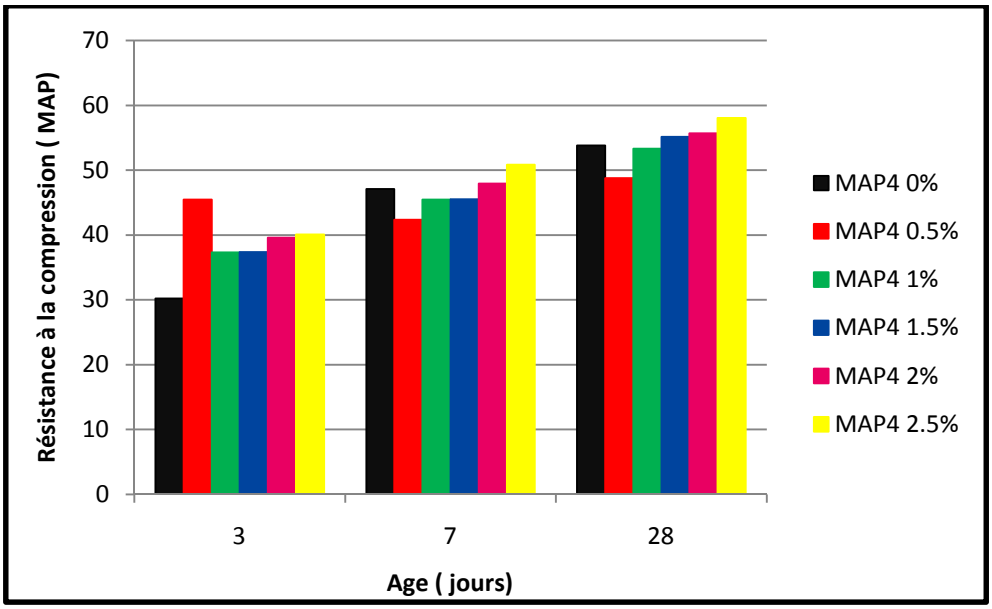


Figure III.17: La résistance à la compression en fonction du temps du MAP4

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs de l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences. Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression **[186]**. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime**. [187], [188]**, dans d'autres une légère diminution **[189], [190]** et **[191]** peut être dû à l'abaissement de l'ouvrabilité se qui à provoqué une réduction de la compacité **[192]**.

S.chakraborty et al **[193]** et confirme une augmentation de la résistance à la compression de 9 % pour les mortiers renforcé de fibres de jutes, cela et du la bonne répartition des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire observé par un microscope à balayage électronique.

III.3.2. Résistance à la traction par flexion

Sept types de mortier contenant trente-trois spécimens prismatiques, de 40 par 40 par 160 mm, ont été coulés pour chaque mélange de mortier pour essais de flexion 3 points, selon la norme EN 12390-1. Ces échantillons ont été coulées dans des moules en acier, après le démoulage les éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20 ° C (EN 12390-2).La résistance à la flexion a été évaluée selon la norme (EN 196-1) sur des éprouvettes prismatiques par le calcul de la contrainte de traction maximale atteinte au fond

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

de la section transversale du milieu de l'échantillon testé. Le module de rupture (MOR) a été obtenu comme suit:

Où L est la charge maximale appliquée (N), d est la distance entre les supports (120 mm), et «e» est la dimension de la section carrée (40 mm).

Les résultats obtenus sont résumé dans les paragraphes suivants :

a. Conservation à l'air libre (mode ambiant)

Les résultats obtenus pour les mortiers autoplaçants conservés à l'air libre à partir du test de résistance à la traction à 3, 7, et 28 jours, et avec différentes fractions volumiques de fibres sont donnés aux **figures III.18** jusqu'au **III.23**. On a constaté que la résistance à la traction est augmenté de **103.68 %** pour une addition des fibres traitées pars NaOH+résine de **3.00%** comme fraction volumique. Ce constat est aussi enregistré pour le MAP3 où on a obtenu une amélioration de la résistance de **41.92%.** D'autre part pour les mortiers MAP1, MAP2, MAP4 et MAP5 on a enregistré des optimums au delà des pourcentages donnés on a obtenu des chutes de résistances. La résistance a été améliorée de **20.8%,40.64%,44.80%,** et **57.76%** pour les fractions volumiques de **1.50%, 2.00%, 2.00%** et **2.50%** respectivement, puis de chute de résistances de **34.85%,17.79% ,6.74 %** et **21.21%** par rapport à la valeur maximum obtenu.

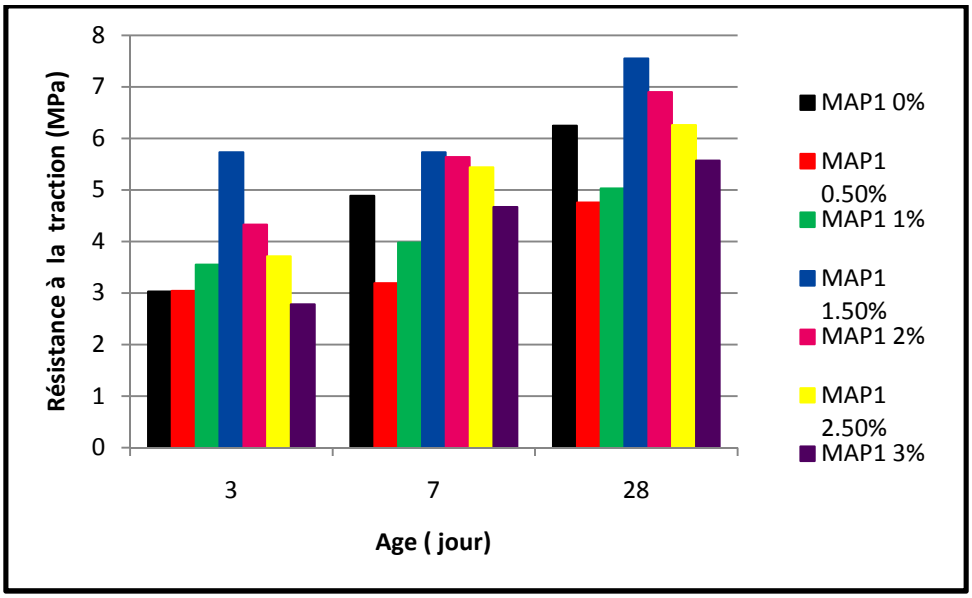


Figure III.18: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP1

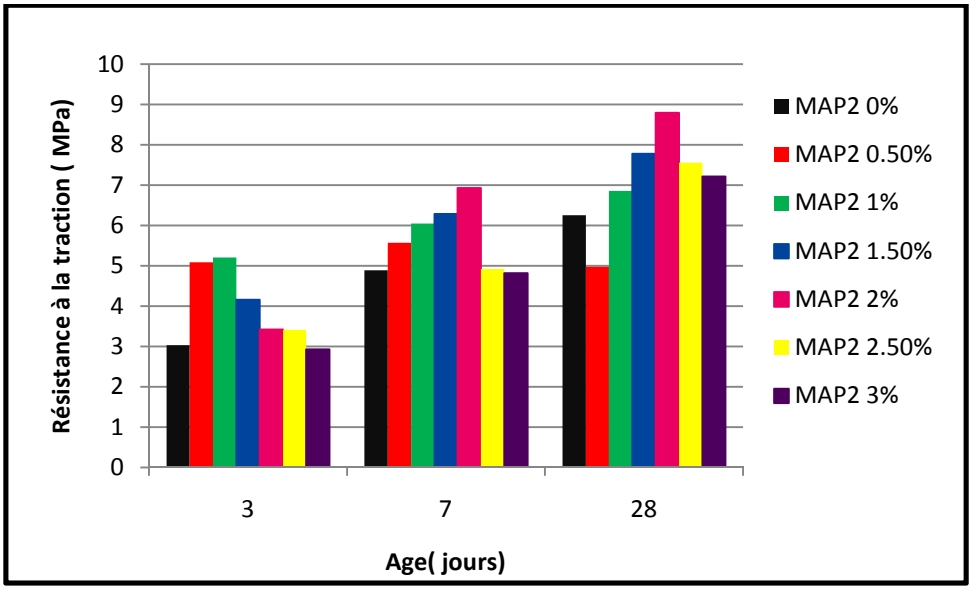


Figure III.19: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP2

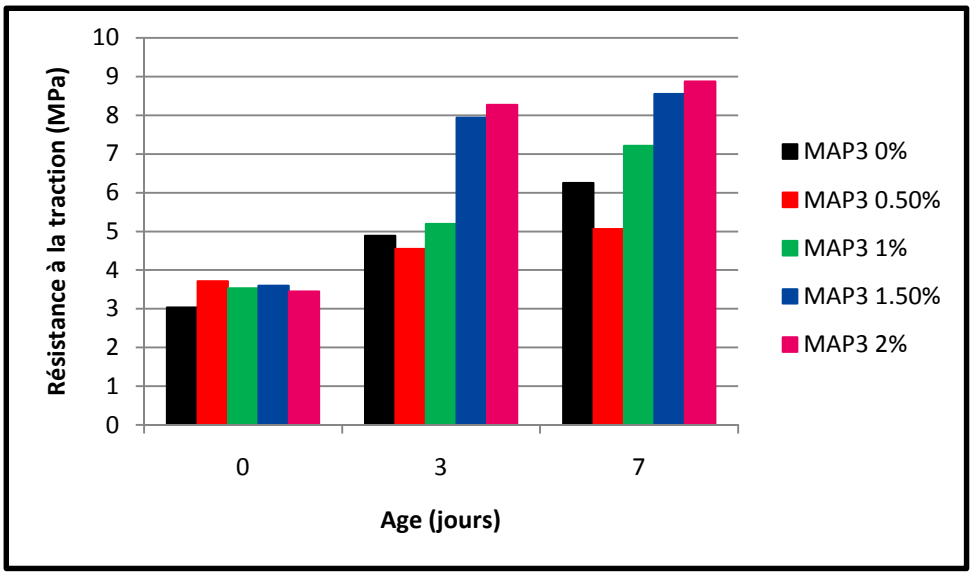


Figure III.20: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP3

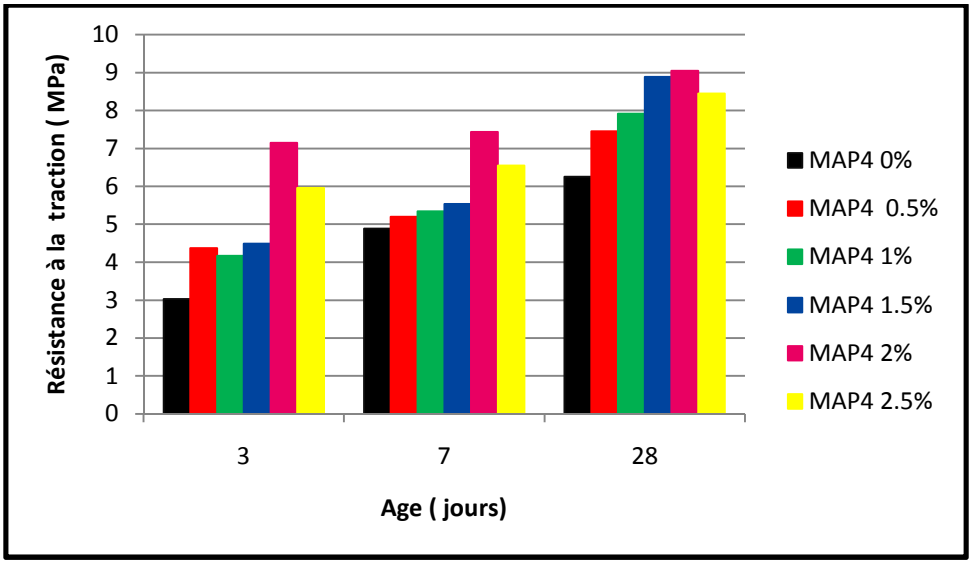


Figure III.21: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP4

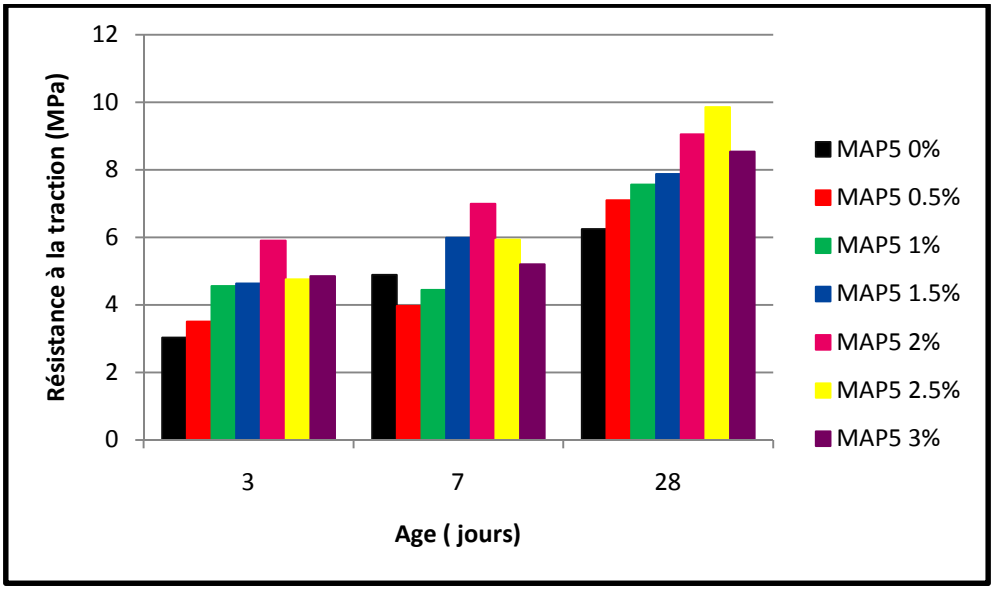


Figure III.22: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP5

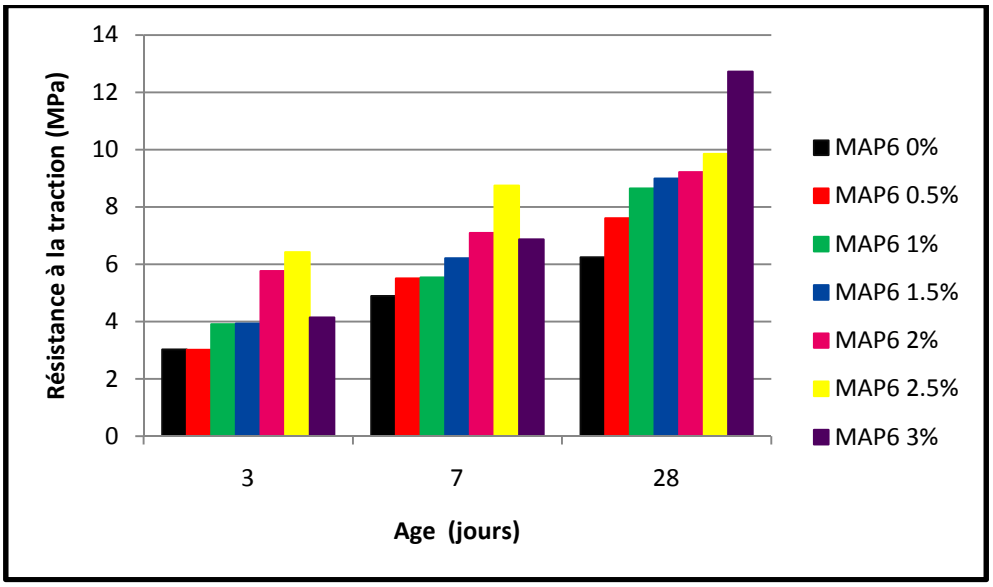


Figure III.23: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP6

b. Conservation dans l'eau (mode saturé)

Les résultats obtenus pour les mortiers autoplaçants conservés dans l'eau (mode saturé) à partir du test de résistance à la traction à 3, 7, et 28 jours, et avec différentes fractions volumiques de fibres sont donnés aux **figures III.24** jusqu'au **III.27**. On a constaté que la résistance à la traction est augmenté de **43.36 %** pour une addition des fibres traitées pars NaOH+la cire de **2%** comme fraction volumique. D'autre part pour les mortiers MAP1, MAP2 et MAP3 on a enregistré des optimums au delà des pourcentages donnés on a obtenu des chutes de résistances. La résistance a été améliorée de **30.08%, 29.92%** et **36.64%** pour les fractions volumiques de **0.50%, 1.50%**et **1.50%** respectivement, puis de chute de résistances **de 49.30%, 30.66 %** et **7.49 %** par rapport à la valeur maximum obtenu.

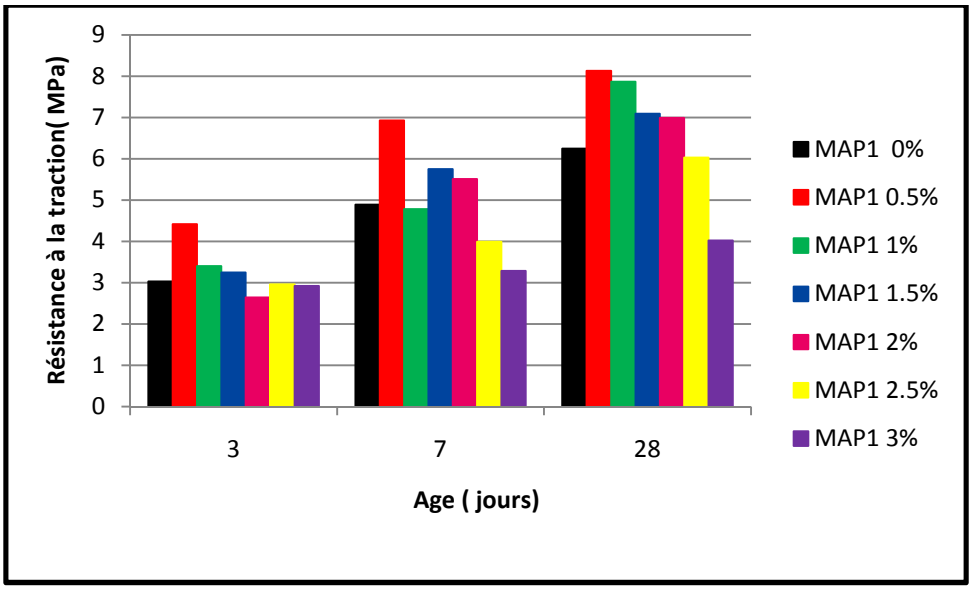


Figure III.24: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP1

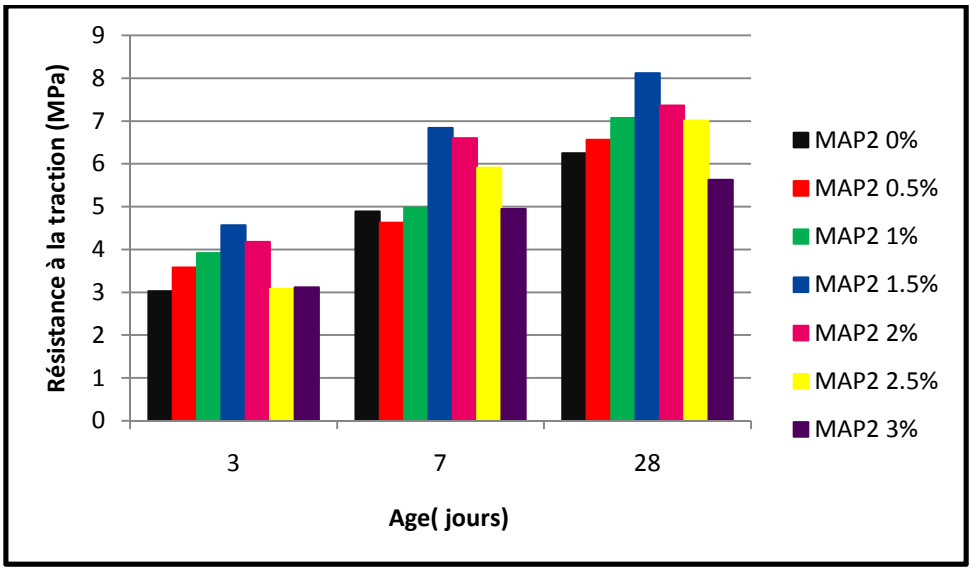


Figure III.25: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP2

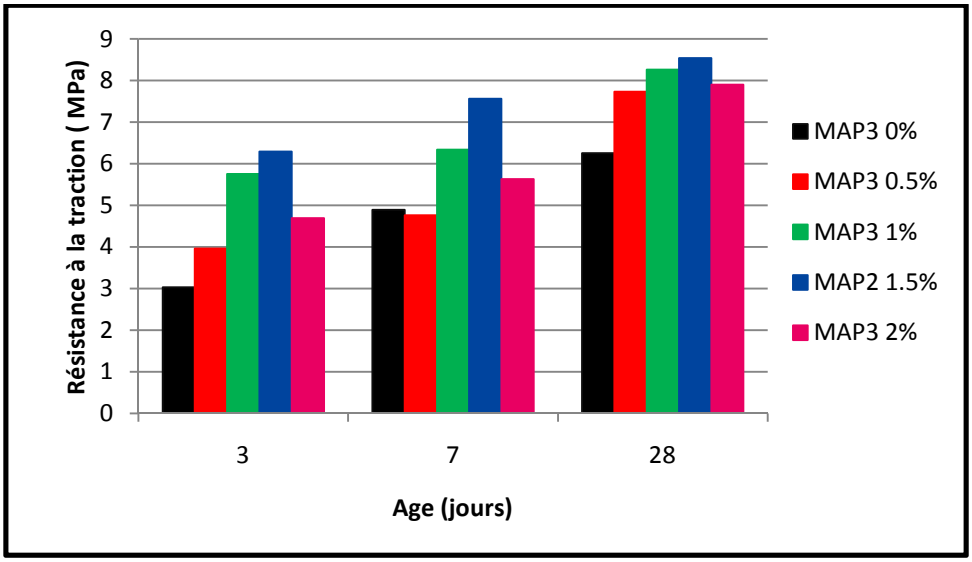


Figure III.26: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP3

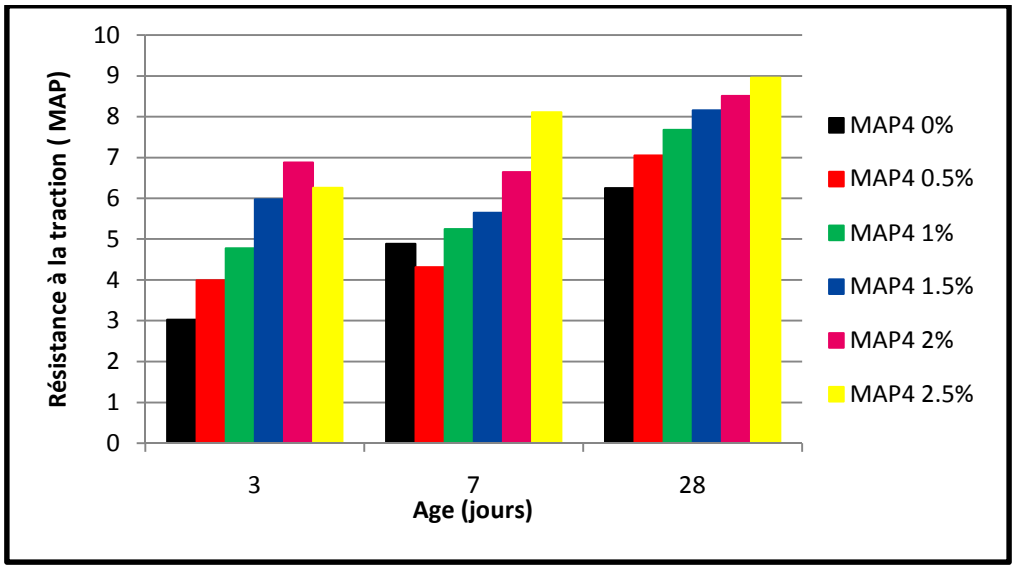


Figure III.27: La résistance a la traction en fonction du temps du MAP4

Les résultats ont révélé que le traitement des fibres à un rôle très important pour l'amélioration de la résistance à traction, cela est du l'amélioration de l'état de surface des fibres, cette modification a permis un lavage des impuretés de surface des fibres et d'une partie des hémicelluloses et par conséquence l'amélioration de l'adhérence des fibres avec la matrice cimentaire. **[185]**. on a obtenu une amélioration de la résistance à la traction par flexion,. Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres **[102], [112]** et **[113]**. S.chakraborty et al **[193]** et confirme une augmentation de la résistance à la traction par flexion de 16 % pour les mortiers renforcé de fibres de jutes, cela et du la bonne répartition des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire observé par un microscope à balayage électronique.

Si on compare ces résultats avec les résultats précédents on conclut que la conservation des échantillons à l'air libre (mode ambiante) a joué un rôle très important dans l'amélioration de résistance à la traction des mortiers autoplaçants fibré, dont la conservation en mode saturé provoque la dégradation du mortier autoplaçant fibré (grande capacité d'absorbation)

III.4. L'effet de traitement des fibres végétales sur les caractéristiques mécaniques des mortiers autoplaçants fibré

L'aspect important du composite ciment fibres végétales est la compatibilité physique et chimique des fibres végétales avec le ciment. Il est bien entendu qu'avec l'addition des fibres végétales dans la matrice cimentaire, les temps de prises des ciments augmentent. L'hémicellulose, l'amide, les tanins et les sucres contenues dans les fibres sont en partie responsable de ces retards de prise. L'alcalinité élevée de l'eau dans les pores de la matrice de ciment affaiblit les fibres de cellulose, induit leur minéralisation et par conséquent, l'affaiblissement de la ténacité des composites **[188, 198].**

Afin d'améliorer l'adhésion entre les fibres et la matrice, les fibres sont soumises à différents traitements. L'hydroxyde de sodium (NaOH) est le plus utilisé dans l'industrie de la papeterie. Il sert à nettoyer et à blanchir la surface des fibres. Ce traitement est choisi pour la modification de l'aspect morphologique des fibres ainsi que d'améliorer leurs propriétés mécaniques (module de résistance à la traction). De plus il est plus efficace et peu onéreux. L'ébullition des fibres de palmier dattiers supprime complètement la présence de sucres hydrosolubles et offre au composite une hydratation et un durcissement comparable à un mortier témoin **[199].** Si l'on compare maintenant les propriétés mécaniques du mortier à base de fibres brutes à celles obtenues pour les fibres traitées par NaOH on a trouvé une amélioration de **21.13** % pour la résistance à la traction.

Ces traitements améliorent la mouillabilité de la fibre avec la matrice et créent un lien fort à l'interface fibre-matrice. Une bonne adhérence à l'interface contribue à son tour, à l'amélioration du transfert de charges entre les fibres et la matrice et par conséquent de meilleures propriétés mécaniques sont accrues. **[199, 200]**.

Les méthodes physiques induisent un changement des propriétés structurelles et surfaciques de la fibre cellulosique. Parmi ces méthodes on cite le calandrage, l'étirement, les traitements thermiques. Ces techniques ne causent pas de modifications chimiques. Dans ce qui suit on cite quelques techniques très répandus pour le traitement physique des fibres végétales.

Les cires, et les paraffines sont largement utilisés dans les composites à base de bois. D'autres additifs comme les élastomères et les plastifiants sont aussi utilisés. Ces produits agissent sur des propriétés spécifiques qui entraînent des modifications de surface permettant d'améliorer d'une manière directe et indirecte la fabrication du composite.

Ces modifications contribuent à faciliter le procédé de fabrication (changements des paramètres du procédé : homogénéisation du mélange, diminution des contraintes mécaniques lors du processus) **[201].** On a trouvé une amélioration des résistances mécaniques de **15.17%** par rapport

Au mortier à base de fibres brutes cela est dû à la bonne répartition des fibres à l'intérieur de la matrice cimentaire. D'autre part ces fibres ont une masse volumique plus importante que les fibres brutes cela peut éliminer le problème de la remontée des fibres sur la surfaces des éprouvettes.

Les matériaux composites à base de fibres lignocellulosiques sont très largement utilisés et font l'objet d'un développement constant depuis de nombreuses années. Dans cette catégorie de matériaux composites fibres lignocellulosiques/ polymère, on distingue deux sortes de produits : les composites utilisant les fibres comme charges afin de réduire leur coût et leur poids et les composites à base de renforts cellulosiques qui permettent l'amélioration des propriétés mécaniques **[202] [203]**. Pour remédier au problème de la traction dans les mortiers on a utilisé le composite fibre/époxy avec différentes pourcentage et on a obtenue une amélioration des caractéristiques mécaniques de **19.86%** par rapport aux fibres brutes .

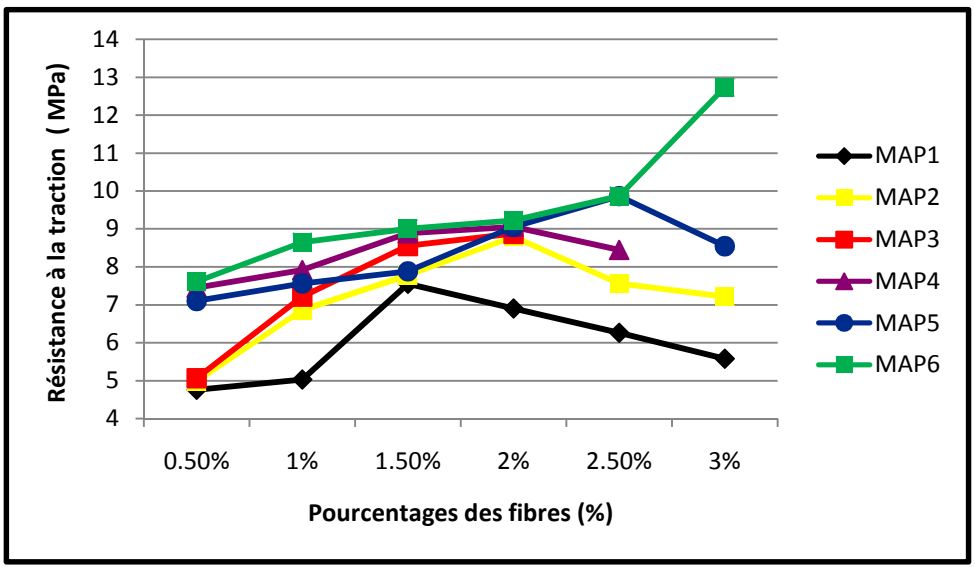


Figure III.28: L'effet du traitement sur Rt (MPa)

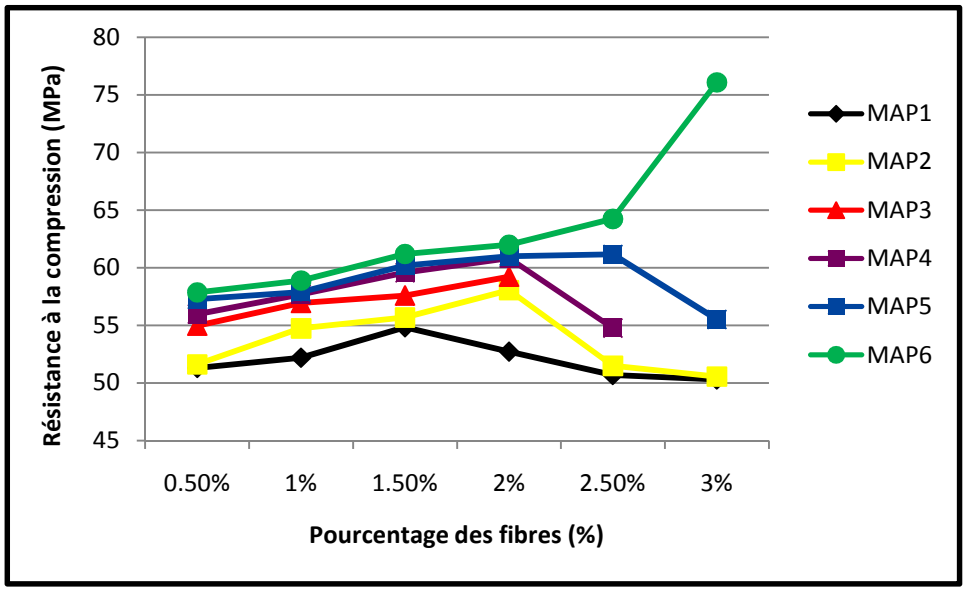


Figure III.29: L'effet du traitement sur Rc (MPa)

En outre, autres traitements sont utilisés pour renforcer le mortier autoplaçant à base de fibres végétales, on a effectué des combinaisons qui sont : NaOH+Cire pour le MAP4 et NaOH+Résine pour le MAP6, les résultats obtenus ont révélé que les caractéristiques mécaniques sont amélioré de **20.16%** et de **68.60%** respectivement, la résine a assuré une bonne adhérence entre les fibres et la matrice cimentaire se qui améliore le transfert de charges entre les fibres et la matrice et par conséquent de meilleures propriétés mécaniques sont accrues. **[199, 200]**.

III.5. Retrait et gonflement

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats des différents essais et mesures et en dégager des conclusions. Nous aborderons d'abord l'étude du retrait libre dans les différents modes de conservation (ambiant et saturé), suivit par celle du séchage du matériau (perte en poids). Nous allons analyser l'influence du type de fibres, et du pourcentage en volume.

Ces **figures III.30, III.31, III.32, III.33, III.34 et III.35** présentent l'effet des fibres végétales sur le retrait et le gonflement du MAPFV. On constate que le retrait est directement dépendant de la teneur en fibres et de l'élancement de ces derniers. Les courbes de toutes les éprouvettes sont convergentes vers un degré de stabilisation d'équilibre à un certain âge par rapport aux éprouvettes témoins.

A. Mode ambiant (Retrait)

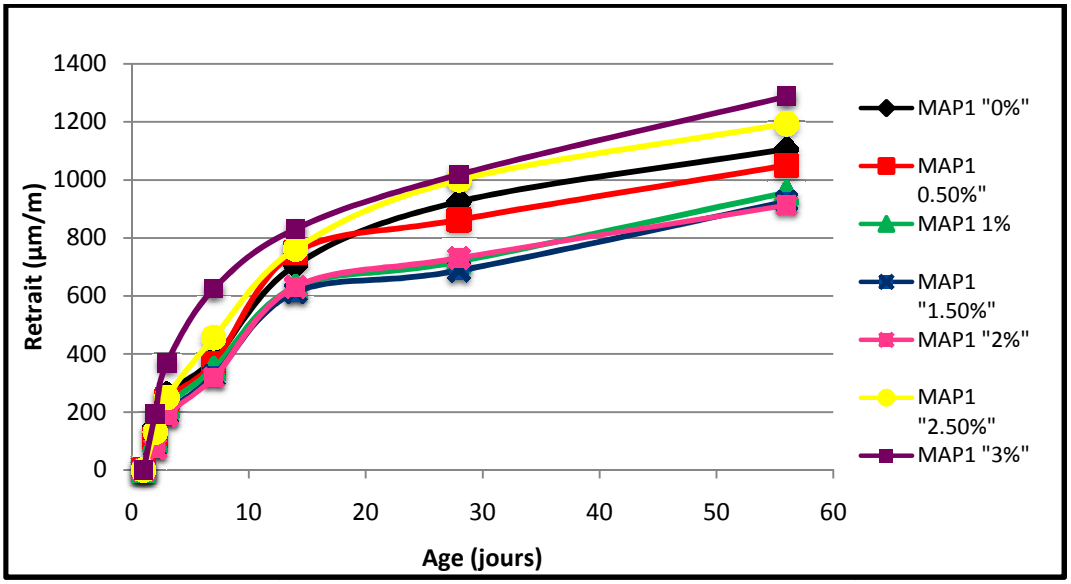


Figure III. 30: Retrait en fonction de l'âge du MAP1

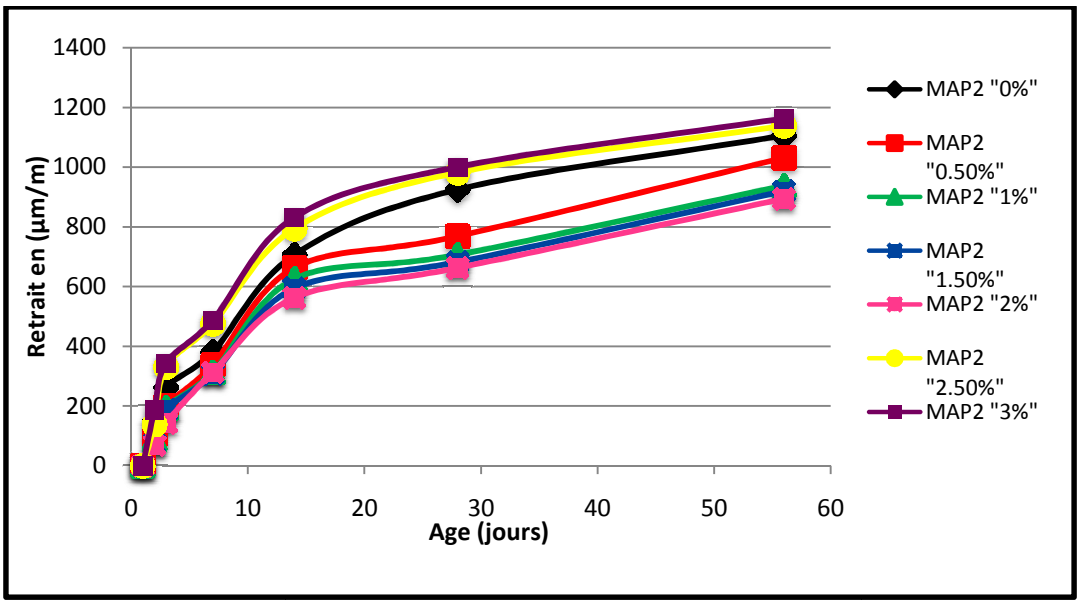


Figure III.31: Retrait en fonction de l'âge du MAP2

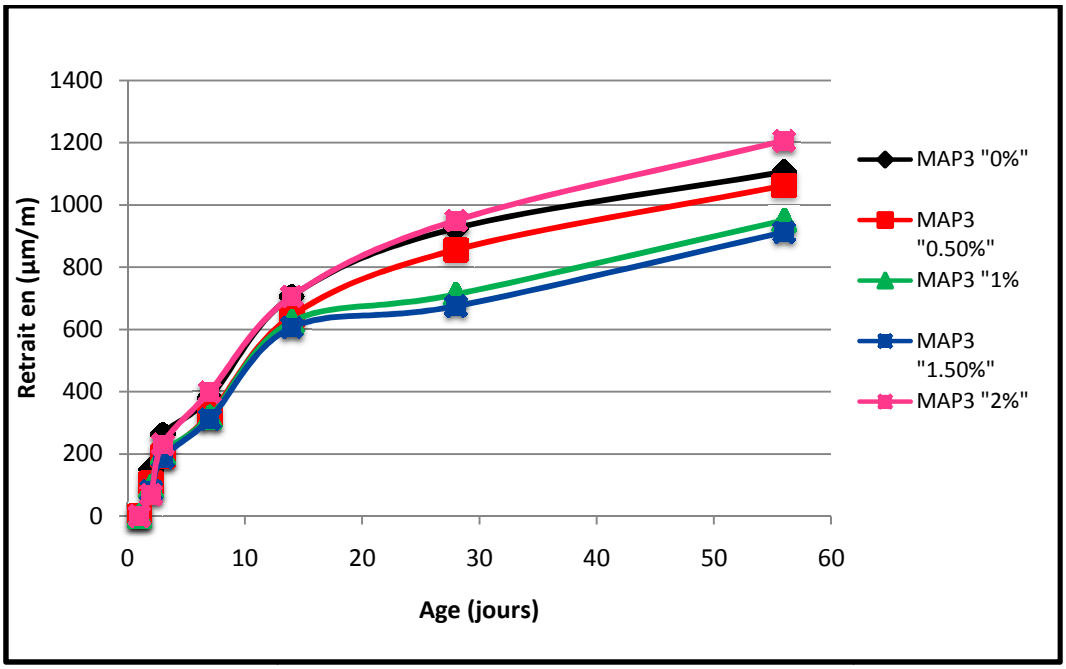


Figure III.32: Retrait en fonction de l'âge du MAP3

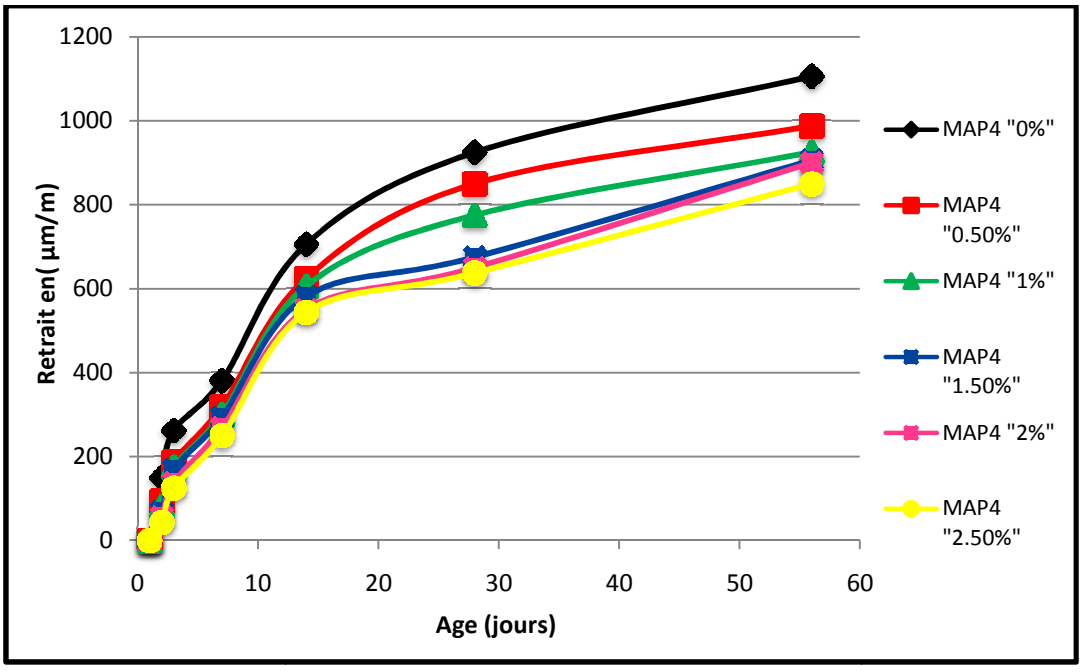


Figure III.33: Retrait en fonction de l'âge du MAP4

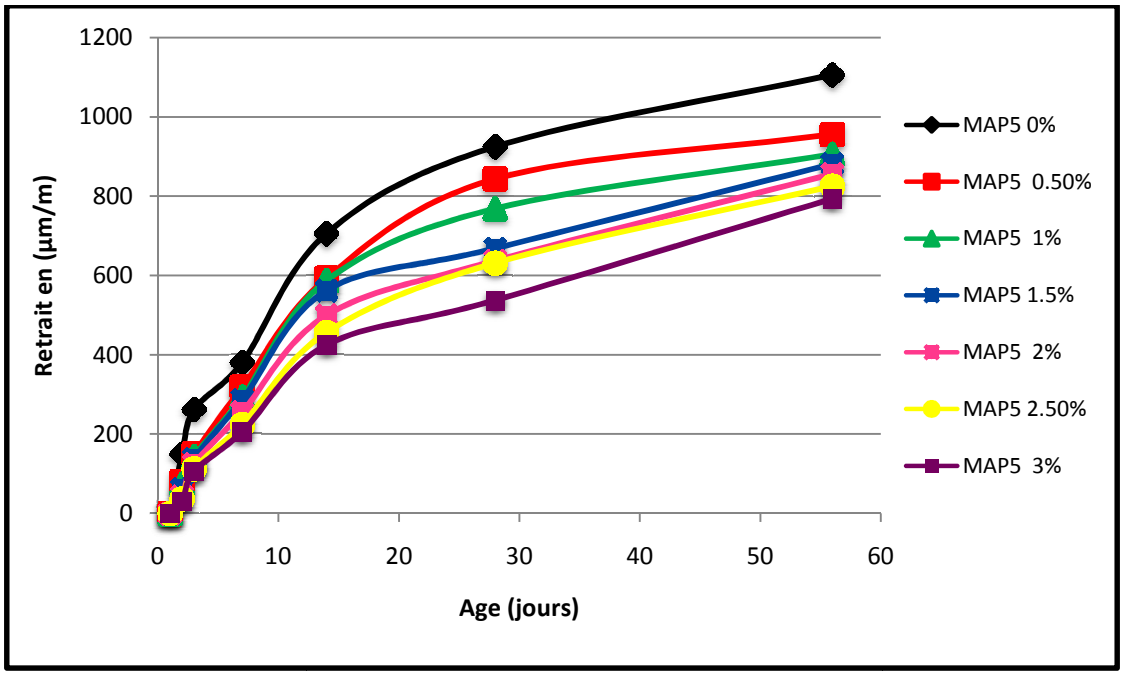


Figure III.34: Retrait en fonction de l'âge du MAP5

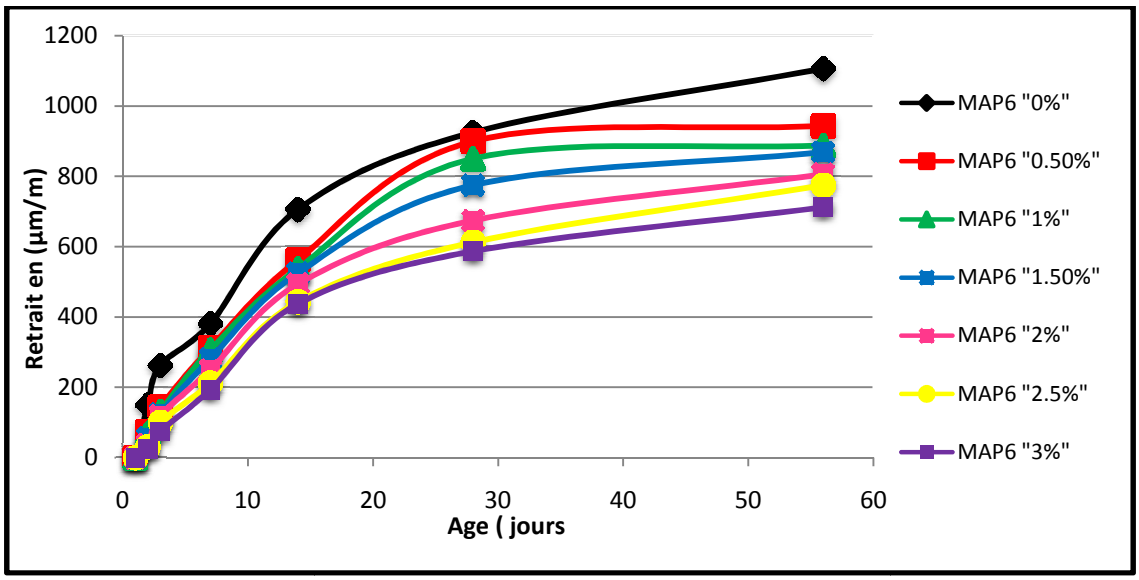


Figure III.35: Retrait en fonction de l'âge du MAP6

D'après les figures de retrait on peut dire que les fibres végétales quelques soit leurs types ayant un effet positif, plus on augmente la fraction volumique des fibres, plus le retrait diminue. La diminution varie entre **5.08%** et **35.59 %,** la plus petite amélioration correspond au mortier de fibres brutes avec 0.5% de volume de fibre, et la plus importante est relative au mortier **MAP6** à base de fibres traitées par NaOH+Résine de **3%** comme fraction volumique.

On note aussi que les valeurs de retrait pour les mélanges des mortiers (**MAP1** et **MAP2**) avec un pourcentage de **2.50%,** et **MAP3** avec un pourcentage de **3%** sont supérieurs qu'au mortier témoin pour ; cela peut être dû au risque de ségrégation qui peut provoquer beaucoup plus des pores dans les mortiers. Ce résultat sera confirmé par l'essai d'absorption d'eau par capillarité.



Figure III.36: les pores

Après une longue durée, l'action des fibres est plus précise. Car les mortiers de fibres se stabilisent plus rapidement que le mortier témoin. Comme on le constate sur les **Figure III.30** jusqu'au **Figure III.35** Nos résultats confirment ceux déjà obtenus par des études antérieures sur l'influence des fibres d'acier sur le retrait **[203], [96], [204], [205]** : à savoir que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal.

B. Mode saturé (gonflement)

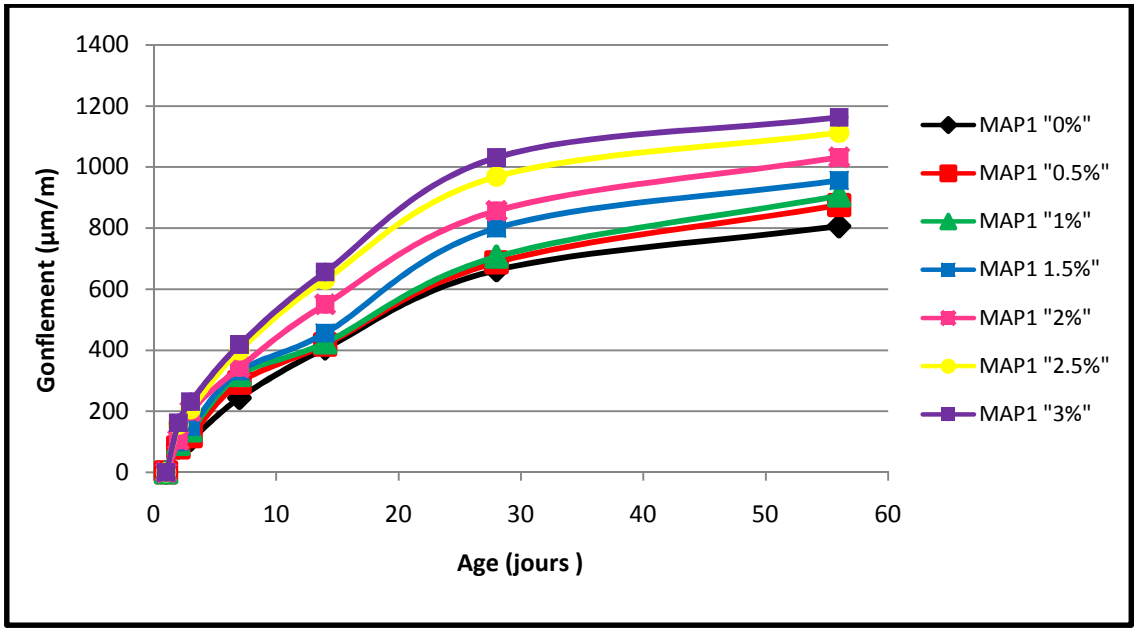


Figure III.37: Gonflement en fonction de l'âge du MAP1

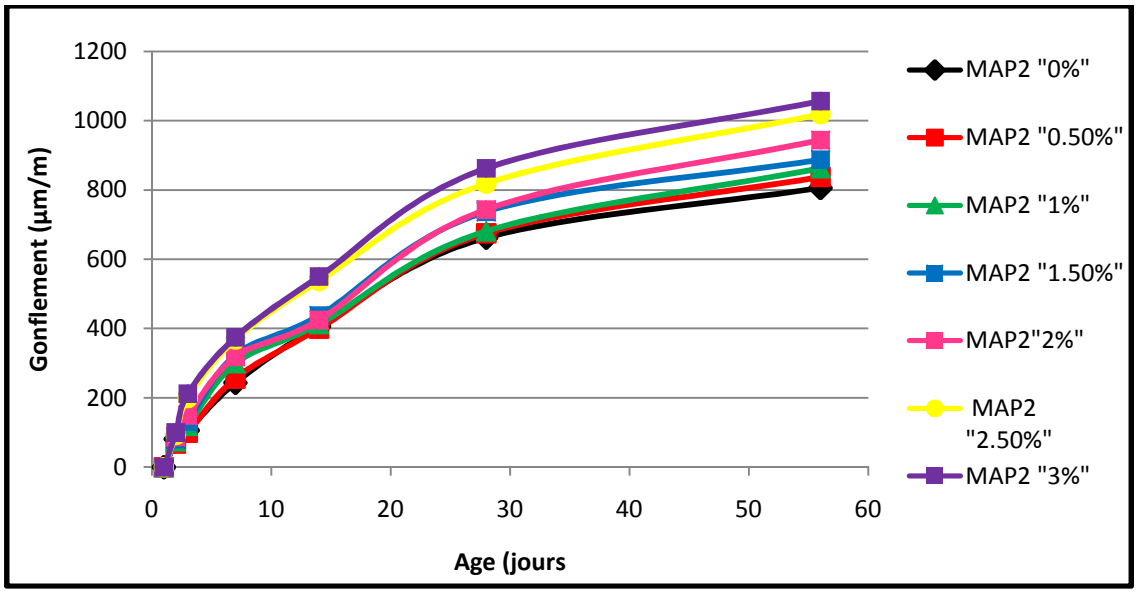


Figure III.38: Gonflement en fonction de l'âge du MAP2

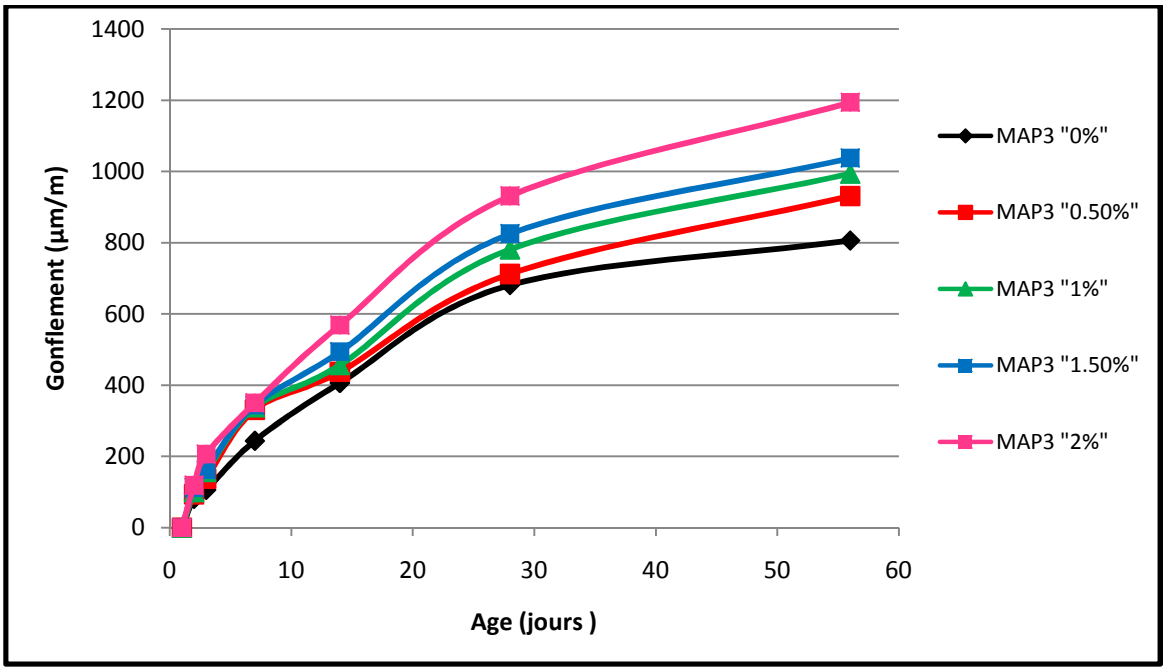


Figure III.39: Gonflement en fonction de l'âge du MAP3

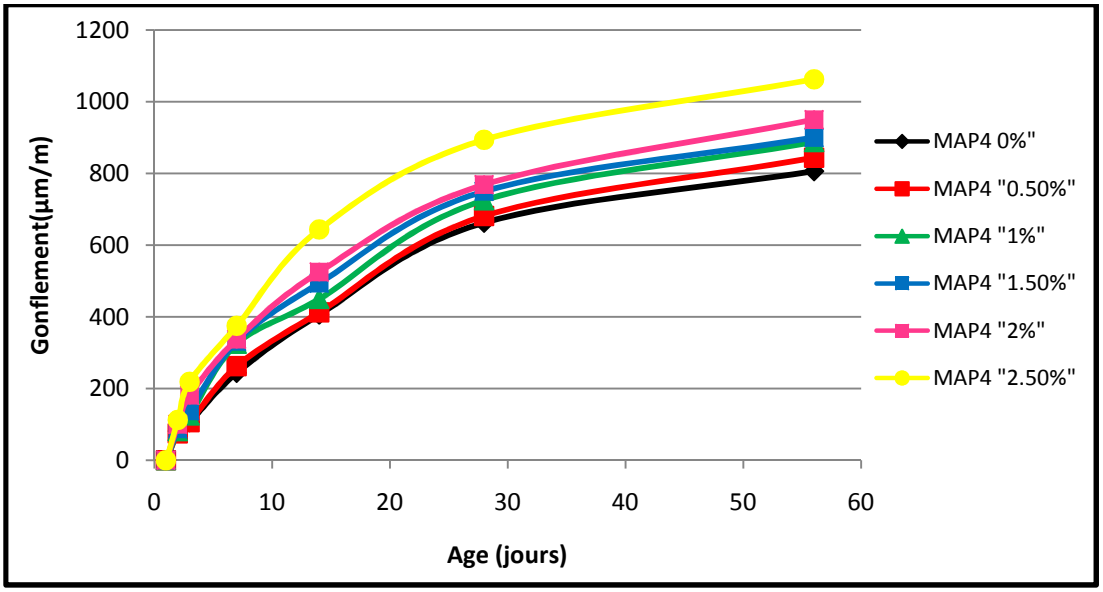


Figure III.40: Gonflement en fonction de l'âge du MAP4

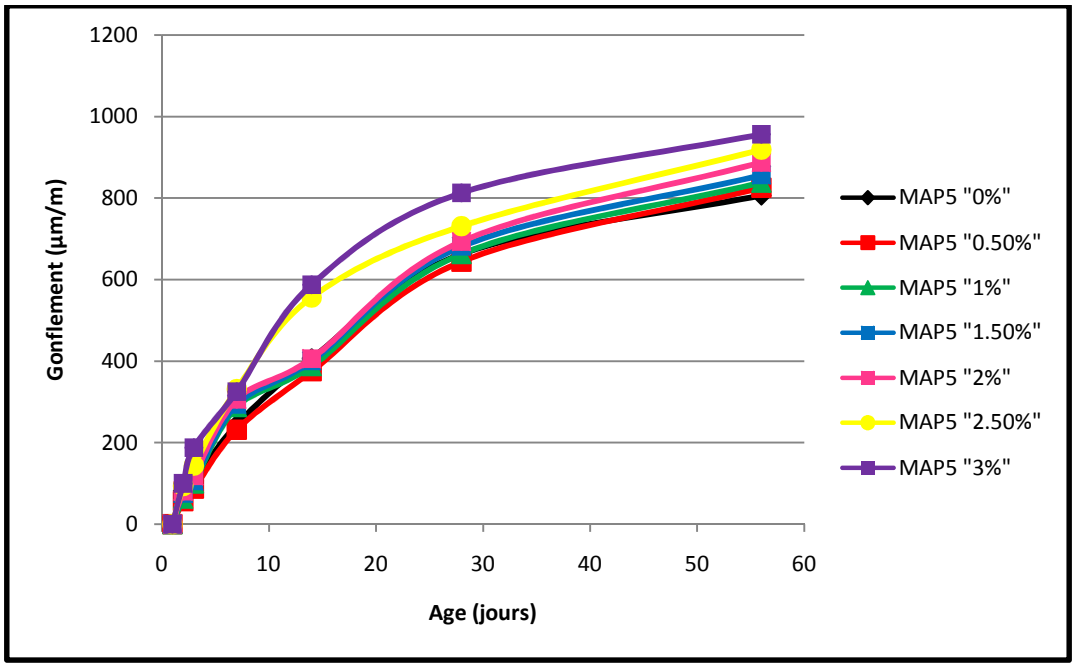


Figure III.41: Gonflement en fonction de l'âge du MAP5

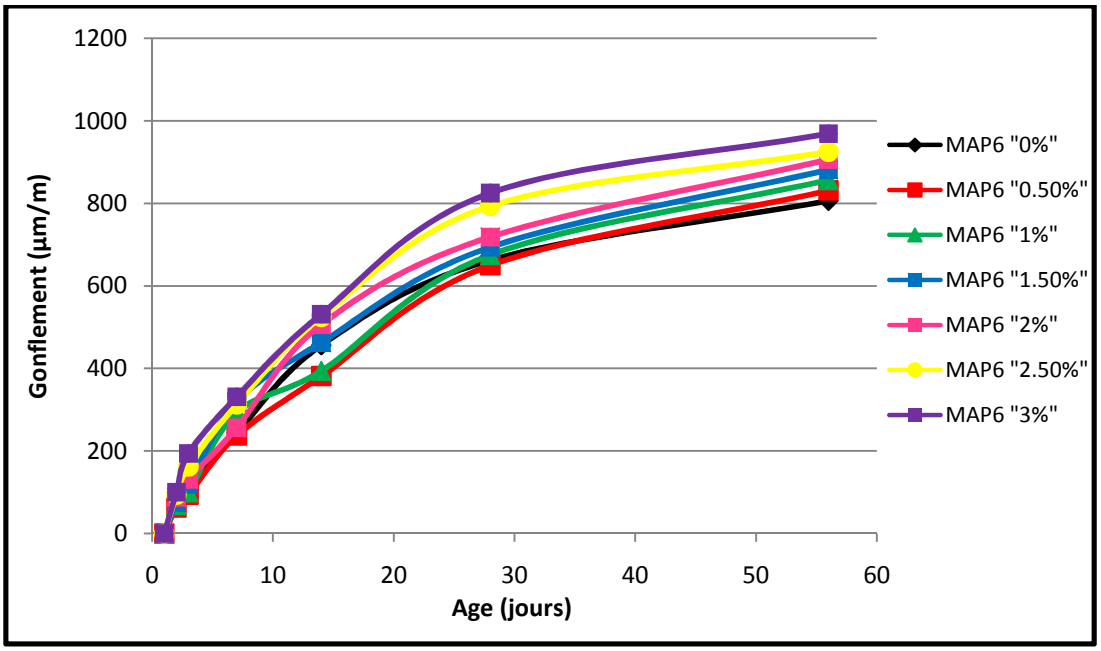


Figure III.42: Gonflement en fonction de l'âge du MAP6

D'après les **Figure III.37** jusqu'au **Figure III.42** On peut dire que les fibres végétales quelques soit leurs types et leurs pourcentages ayant un effet négatif, plus on augmente la fraction volumique des fibres, plus le gonflement augmente. L'augmentation varie entre **3.10%** et **48.06%** , la plus petite augmentation correspond au mortier **MAP6** à base des fibres traitées par NaOH +Résine de **0.5%** comme fraction volumique, et la plus importante est relative au mortier **MAP3** des fibres traités par NaOH avec un pourcentage de **2%.**

C. Perte en poids des différents mélanges

Le retrait ne serait déroulé sans qu'il y ait eu une perte d'eau et par conséquent une perte de masse. Les **Figure III.43** jusqu'au **Figure III.48**, relatives à la perte de masse dans le temps pour les différents pourcentages de fibres employées, confirment bien l'existence du retrait enregistré dans les matériaux testés. Les valeurs de mesure du poids échelonnées dans le temps sont représentées dans les figures suivantes.

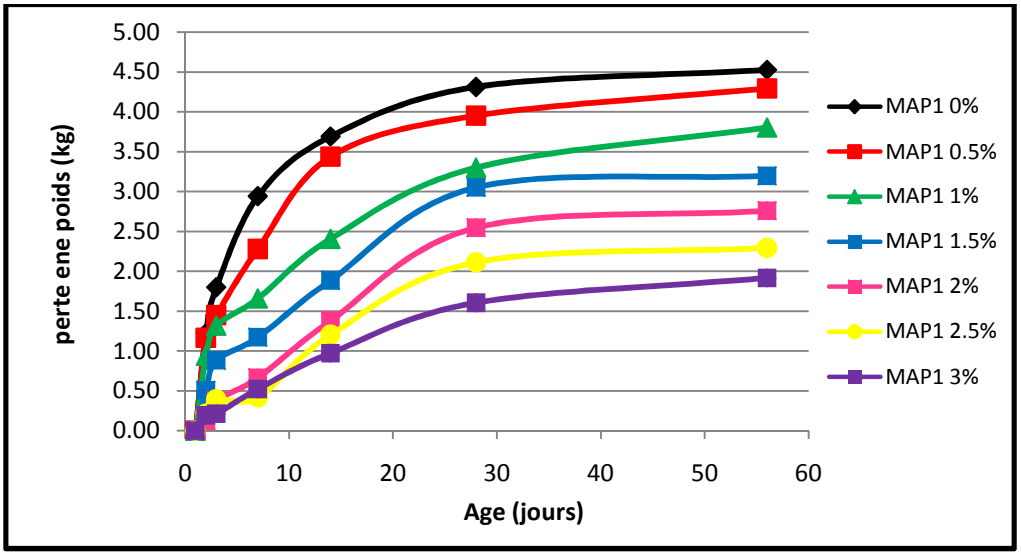


Figure III.43 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP1

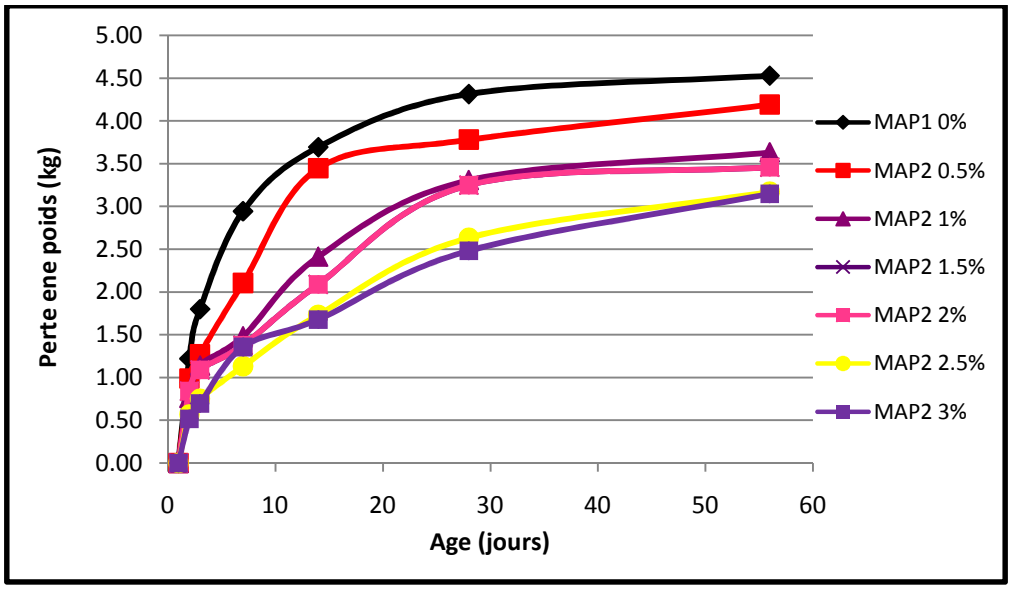


Figure III.44: Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP2

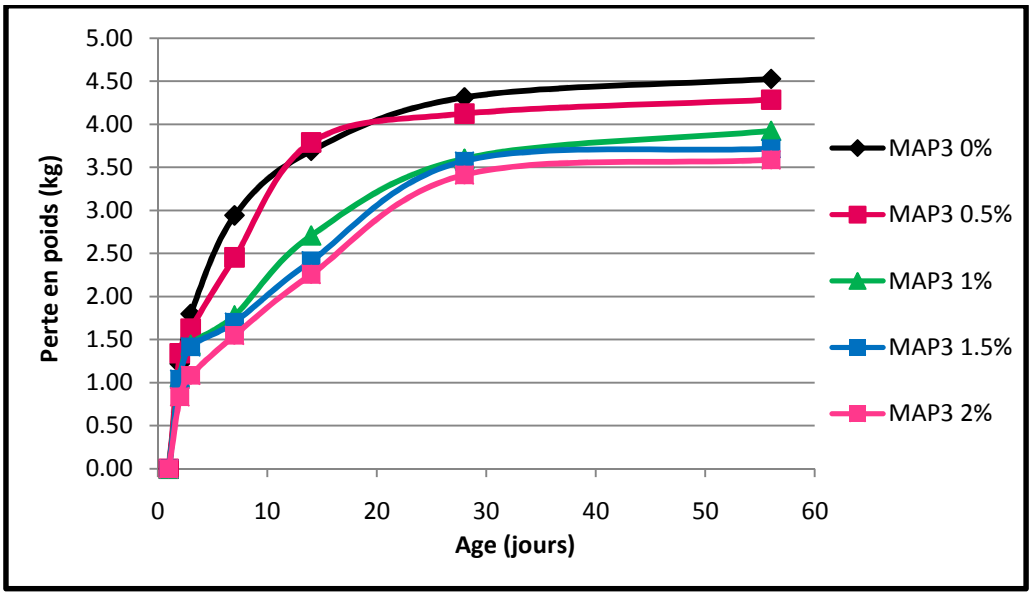


Figure III.45 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP3

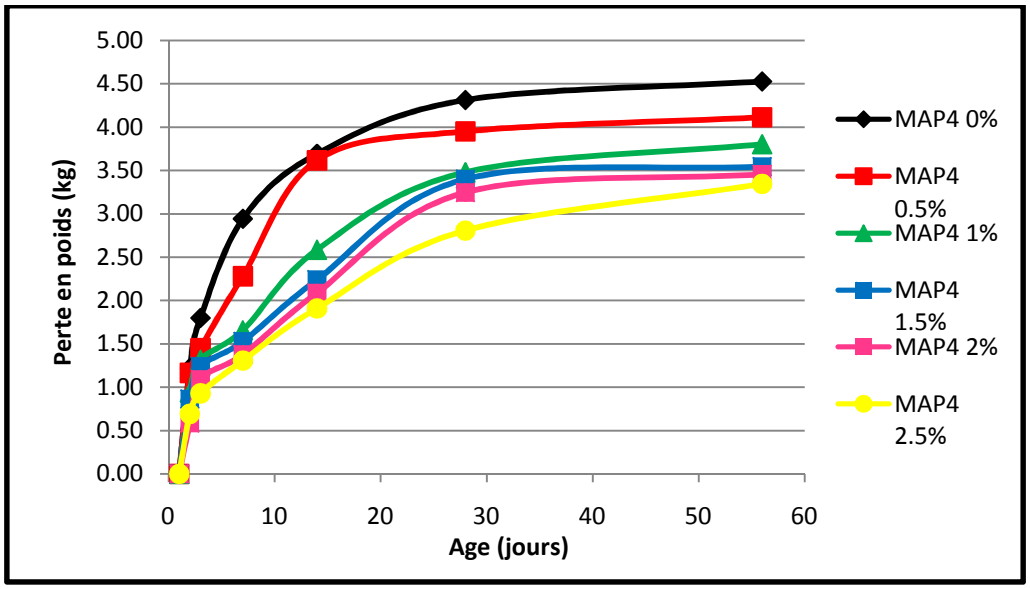


Figure III.46 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP4

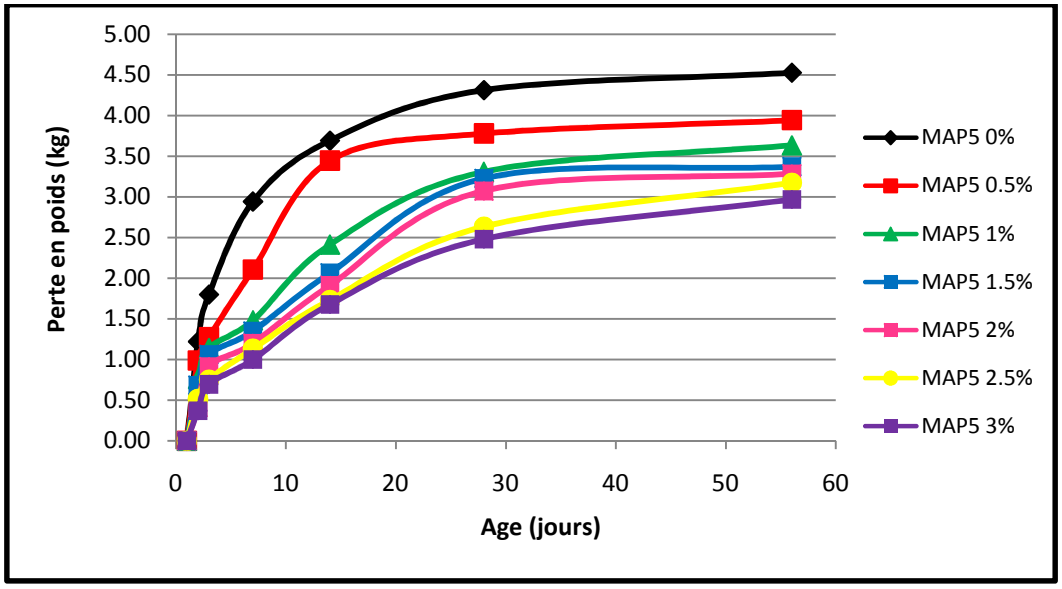


Figure III.47 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP5

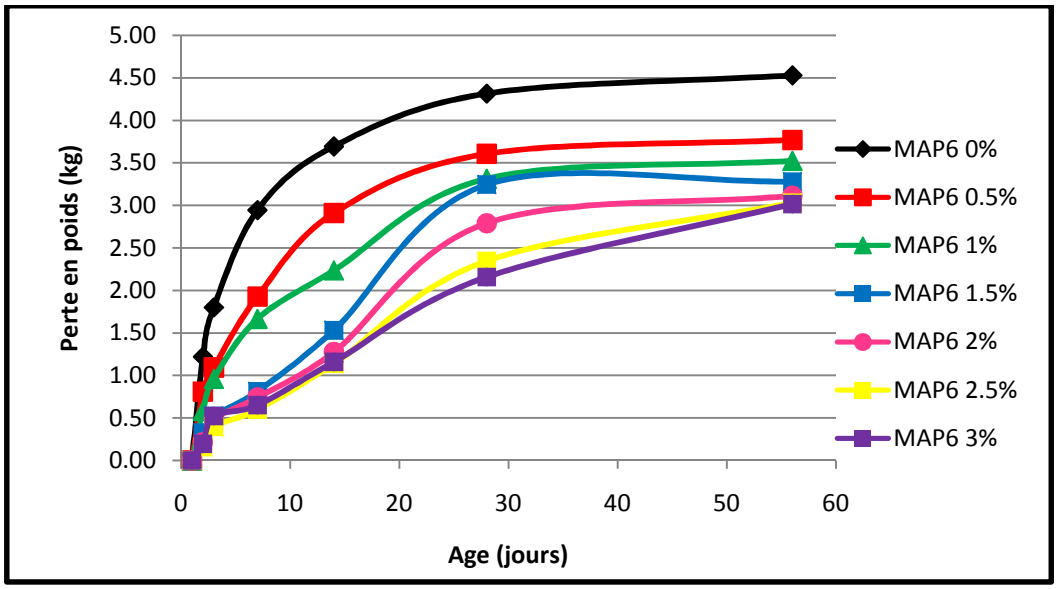


Figure III.48 : Evolution de la masse des composites en fonction de temps du MAP6

Les figures les **Figure III.43** jusqu'au **Figure III.48** représentent l'évolution de la masse des composites en fonction de temps pour différentes concentrations des fibres. Il semble que la légèreté des échantillons des composites de fibre de palmier dattier / mortier est directement inversement proportionnelle avec le pourcentage des fibres et l'âge de conservation. Notons que ces composites sont séchés à l'air libre pendant 56 jours est caractérisés par une légèreté plus bas que celui d'un mortier sans fibres. En termes de valeurs, la diminution varie entre **5.15%** et **33.40** %, la plus petite diminution correspond au mortier de fibres brutes **MAP1** avec 0.5% de volume de fibre, et la plus importante est relative au mortier **MAP6** à base de fibres traitées par NaOH+Résine de 3% comme fraction volumique.

On constate qu'à très jeune âge le mortier renforcé de fibres perd moins d'eau que le mortier témoin, cela est dû sans doute aux traitements physiques et chimiques des fibres qui gênent le départ de l'eau ; la cire et la résine provoquent une adhérence parfaite qui rend la structure du mortier moins poreuse et par conséquence plus compacte.

III.6. L'absorption d'eau

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, Tel est le cas des mortiers, qui grâce à leur capacité d'absorption d'eau, peut engendrer des dommages internes au mortier .Dans cet essai, on déterminer justement la grandeur de cette capacité d'absorption d'eau pour les différents mélanges et de distinguer les paramètres influents sur cette caractéristique

Le coefficient de l'absorption capillaire est donné par la formule suivante

$$\mathbf{AC_{\%} = (M_{SAT} - M_{SAC}/M_{SAC}) \times 100}$$

Où :

$\boldsymbol{M_{SAC}}$: Masse de l'éprouvette sèche après passage à l'étuve à 105°C

$\mathbf{M_{SAT}}$: Masse de l'éprouvette immergée dans l'eau.

Les figures suivantes présentent l'effet des fibres végétales sur l'absorption d'eau par capillarité du MAP.

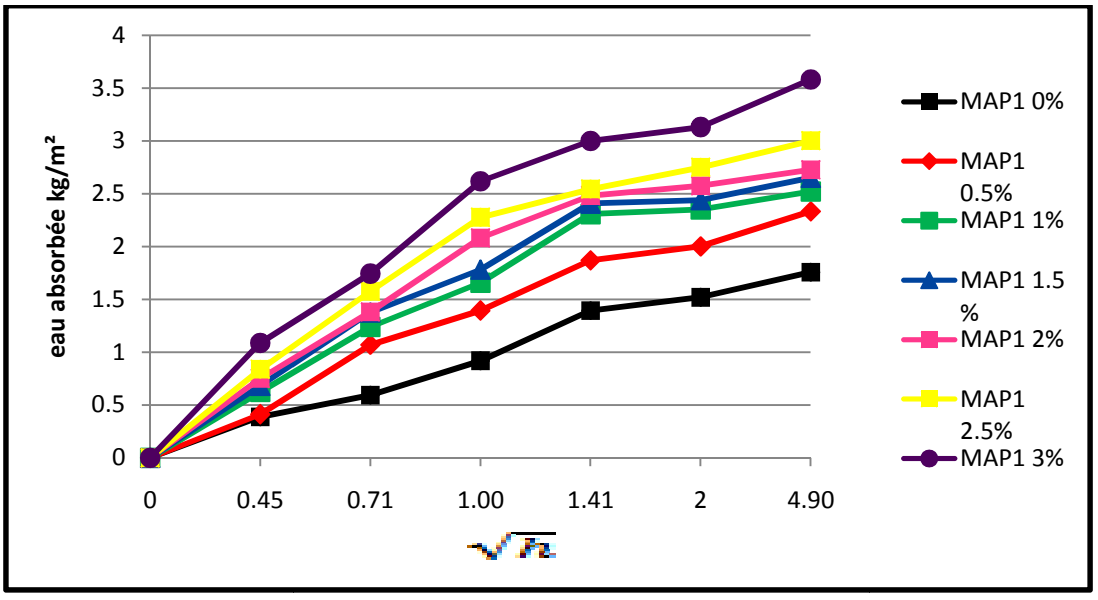


Figure III.49 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP1

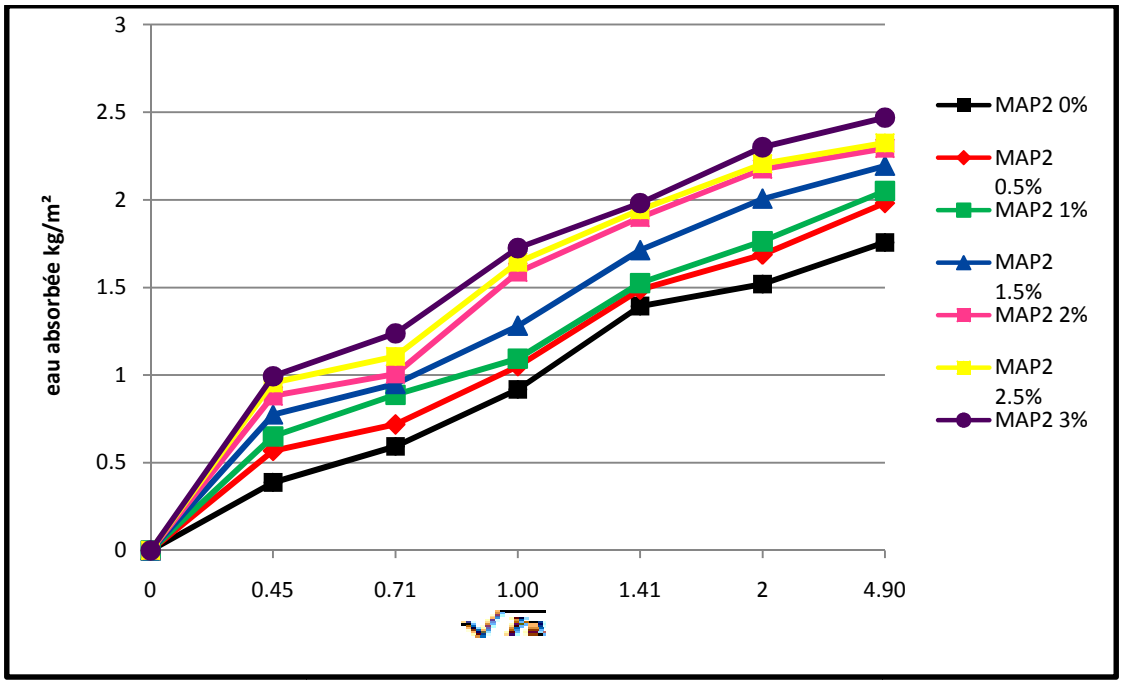


Figure III.50 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP2

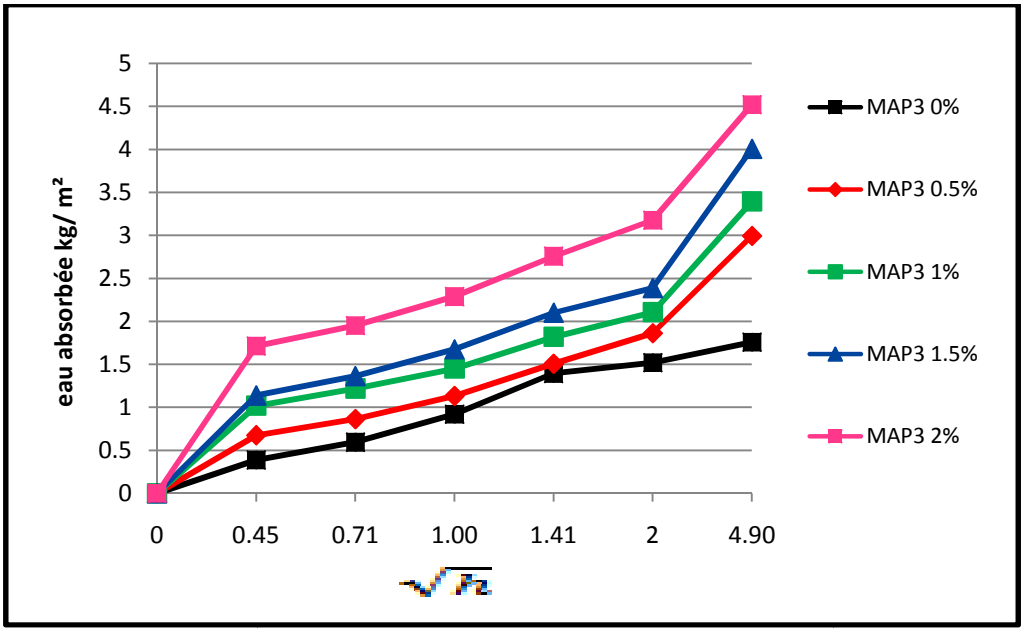


Figure III.51 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP3

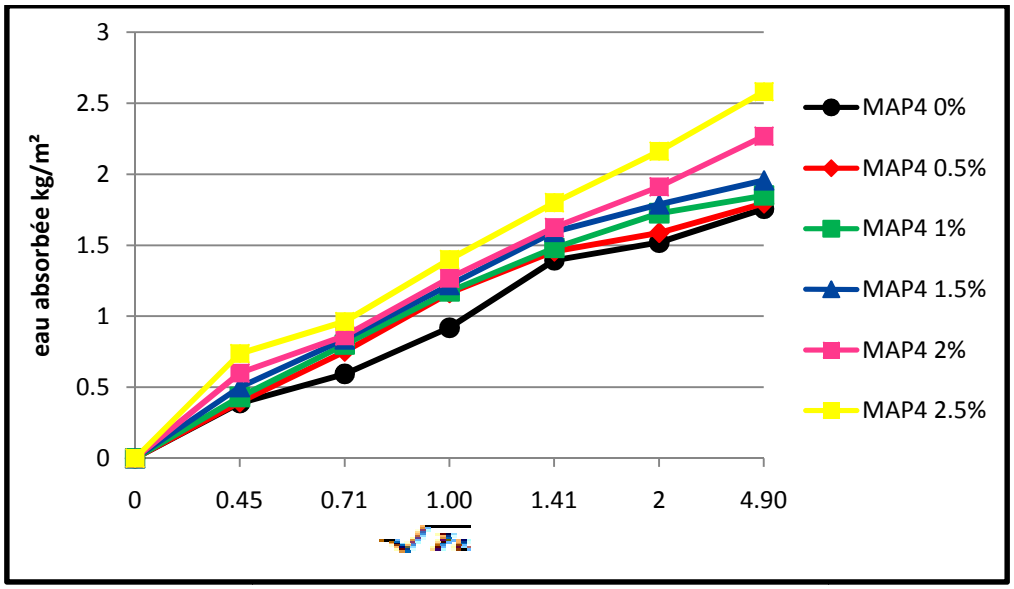


Figure III.52 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP4

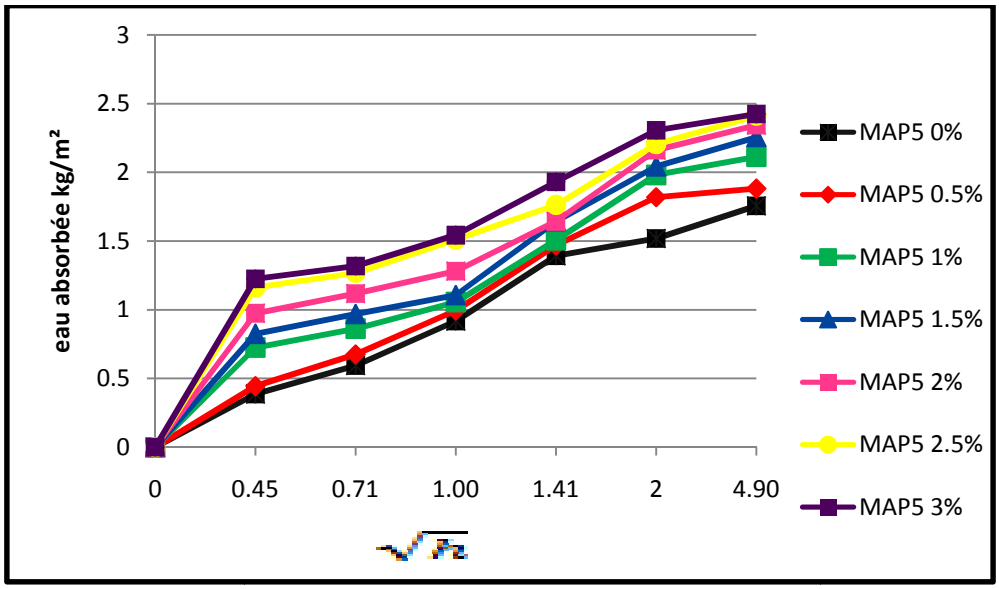


Figure III.53 : Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP5

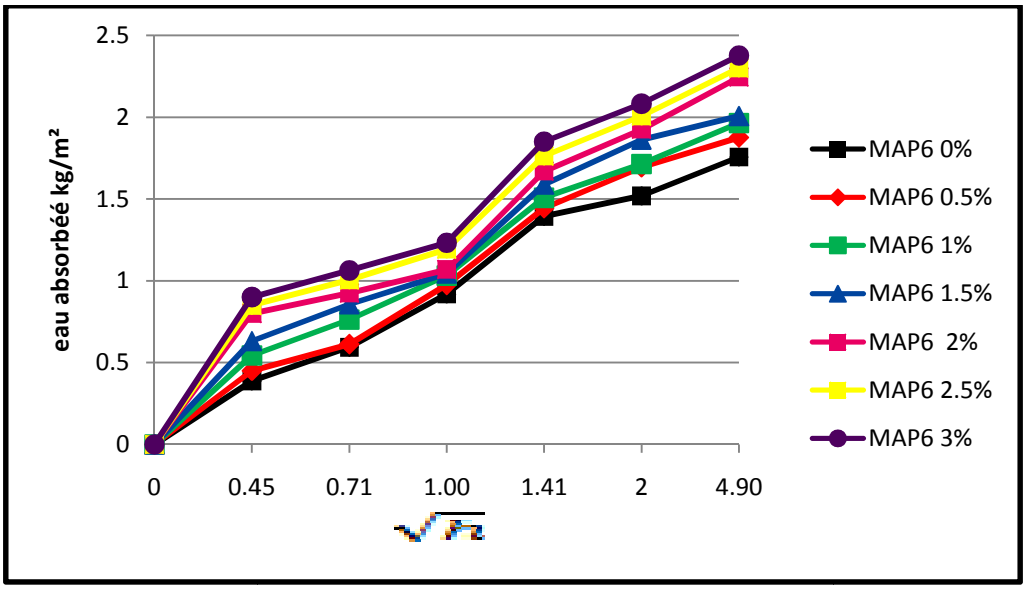


Figure III.54: Absorption d'eau en fonction de racine du temps du MAP6

On remarque que la capacité d'absorption d'eau du mortier augment avec l'augmentation de dosages en fibres végétale. Ainsi l'introduction de fibres dans le mortier se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau, nos résultats vont dans le même sens ceux des travaux de, Elhachem.M **[96]**

III.7. Densité (masse volumique)

Les résultats des densités des différents mortiers réalisés sont illustrés dans la (**figure III.55**) suivante

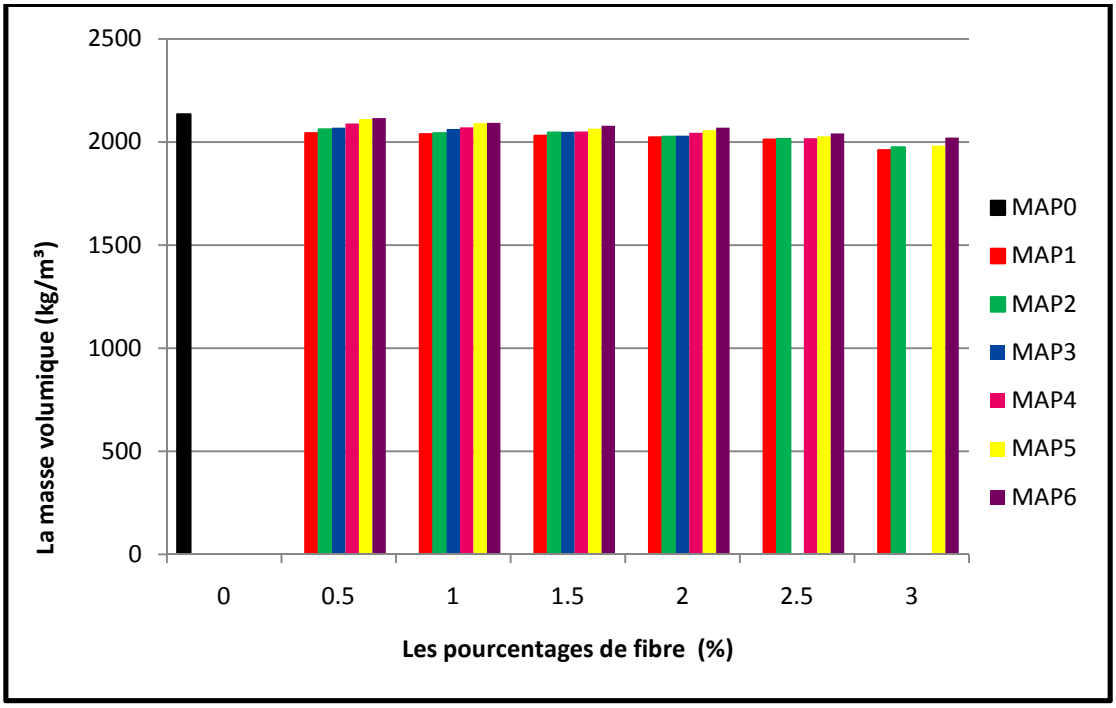


Figure III.55 : Evolution de la masse volumique en fonction des pourcentages

D'après la **figure III.55** Précédente on remarque que la densité des mortiers de fibres a une densité plus moins que le mortier témoin, Pour cela on dit que l'introduction de fibres influe sur la densité des mélanges correspondants. On constate que cette diminution est provoquée par la densité faible de fibre végétale.

On remarque aussi que la densité est directement proportionnelle avec les pourcentages de fibre. Cette augmentation dépend de traitement chimique et physique de fibre.

III.8. Conclusion

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

Pour l'état frais :

- plus on augmente la fraction volumique des fibres végétales plus l'étalement diminue.
- plus on augmente la fraction volumique des fibres végétales plus le temps de V-funnel augmente .
- Le traitement alcalin par la soude augmente l'absorption d'eau qui résulte une diminution de diamètre d'étalement et une augmentation de temps de passage à travers le V-funnel
- Le traitement physique (traitement par Résine et Cire) a un rôle très important pour l'amélioration des caractéristiques à l'état frais.

Sur la performance mécanique:

- La densité des mortiers autoplaçant à base de fibres végétales est moins importante que le mortier témoin, plus on augmente la fraction volumique des fibres végétales, plus la densité du MAP diminue .
- La résistance à la compression des MAP renforcé par des fibres végétales est légèrement supérieure par rapport au MAP témoin.
- La résistance à la flexion du MAP est améliorée en fonction de l'augmentation de la fraction volumique de fibres végétales ajoutées .
- Une amélioration remarquable de la résistance à la traction par flexion notamment pour les mortiers à base de fibres traitées.
- Les combinaisons du traitement améliorent de plus en plus la traction par flexion.
- L'augmentation de la teneur en fibre mène à une réduction importante du retrait et augmentation du gonflement du MAP .
- L'absorption par capillarité est augmentée par l'augmentation de la teneur en fibres végétales.

- Les combinaisons du traitement ont un effet positif sur l'absorption d'eau par capillarité.

Sur la base, le MAP à base des fibres végétales traitées par NaOH + la résine avec une fraction volumique d'ajout de 3 % semble être le meilleur à l'état frais et durci et par suite il est fortement recommandé dans le domaine de la réparation des structures endommagées.

Conclusion

Générale



Conclusion générale

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

- Le traitement des fibres végétales diminue le temps de prise et augmente la résistance mécanique (Rc + Rt) du MAP.
- Les temps d'écoulement à travers le V-Funnel est proportionnel au pourcentage de fibres végétales ajoutées, par contre le diamètre d'étalement est inversement proportionnel à ce dernier.
- La densité du MAP chute en fonction du pourcentage d'ajout en fibres végétales.
- Coté durabilité, le traitement des fibres végétales influe négativement sur l'absorption d'eau et le gonflement, mais par contre contribue à la diminution du retrait du ce dernier.
- L'effet de la cure à l'air libre contribue d'une façon remarquable à l'amélioration des propriétés du MAP.

Sur la base, le MAP à base des fibres végétales traitées par NaOH + la résine avec une fraction volumique d'ajout de 3 % semble être le meilleur à l'état frais et durci.

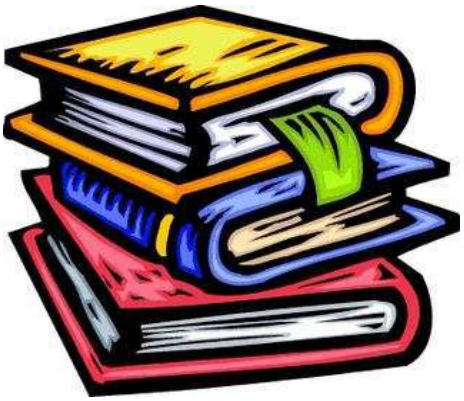
RECOMMANDATIONS

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

- Etude de l'effet de la longueur des fibres sur le comportement rhéologique et mécanique des mortiers autoplaçants fibrés.
- Etude de l'effet des fibres végétales traitées sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants fibrés.
- Etude de l'effet d'autres traitements sur les fibres végétales.
- Etude de l'influence de ce type de fibres traitées sur d'autres types de béton (BHP, BCR, …etc.)
- La valorisation d'autre type de fibres végétales dans les BAP et MAP.
- Etude de l'effet de gel /dégel sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons autoplaçants à base des fibres végétales.

Références

Bibliographiques



[1] Dimitri Kottas, « Le béton ». Livre, architecture et construction « Linksbooks »

[2] Paul Maurenbrecher, A.H et all, « Les mortiers de rejointoiement pour les bâtiments de maçonnerie ancienne», Notice technique édité par l'Institut de recherche en construction du CNRC, Canada, 04/2008.

[3] Groupe des ingénieurs, « Mortiers et bétons hydraulique, matériaux de construction », Edition Eyrolles, Paris, 1997.

[4] Valerie Polet, et all, « Les mortiers de réparation en Belgique et au niveau européen », Belgique ,2010.

[5] ASTM C270, « Standard Specification for Mortar for Unit Masonry », Norme Américaine, January 1999.

[6] G.Tout le monde ,« Notion sur les matériaux de construction et la pratique des travaux », Edition Eyrolles, Paris.

[7] BRAHMA. A « Le béton », Office des publications universitaires, Alger, 1996.

[8] GEORGES DREUX, JEAN FESTA ,« Nouveau guide du béton et ses constituants, 8eme édition, Eyrolles ,1998.

[**9] CIM béton**, « Bétons et mortiers : préparation et mise en oeuvre sur chantier » Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, 2008.

[**10] J.BARON, J.P.OLLIVIER** « LES BETONS », bases et données pour leur formulation, édition Eyrolles, 1999.

[11] Dr. CHERAIT Yacine, Mr NAFA Zahredine, « Eléments de matériaux de construction et essais », Direction de la publication universitaire de Guelma, 2007.

[12] ADAM M.NEVILLE, Michel Pigeon , « Propriétés des bétons », traduitpar CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton SHERBOOKELaval-éditions Eyrolles 2000-paris.

[13] Le laboratoire des travaux publics de Polynesi, « La durabilité des bétons », Notice technique, 2008.

[14] CIM béton, « Les ouvrages en béton : durabilité, dimensionnement et esthétique », Fiche technique édité par le centre d'information sur le ciment et ses applications , Tome 3, Paris, 12/2008.

[15] Brixi nezha Khadoudja , « Etude du retrait des betons autoplaçants» , thèse de master en génie civil de université ABOU BEKR BELKAID- tlemcen , Algérie ,2014 .

[16] Boualem Abdi , « La durabilité des bétons autoplaçants destinés à la réparation des infrastructures », Sherbrooke (Québec), canada , Novembre 2005.

[17] l'Association Française de Génie Civil (AFGC) dans sa collection de documents scientifiques et techniques, « Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances: Recommandations provisoires », janvier 2002

[18] Sheinn, A.M.M, «Rheological modelling of self-compacting», Doctoral Thesis of National University of Singapore, Singapore, 2007

[19] Okamura H. and Ouchi M, « Self-compacting concrete » Journal of advanced Concrete Technology, 2003, vol 1, n°1, pp. 5-15.

[**20] H. Okamura , K. Ozawa, and M. Ouchi**, «Self-compacting concrete» . Structural Concrete, 17, March 2000.

[21] RARES Hanaa « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée », 07 Décembre 2009

[22] Mohamed A S Mohamed, « Influence de la valorisation des microfibres végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de GEL –DEGEL de BAP », Thèse de Doctorat, l'université de Cergy-Pontoise, 15 Décembre 2011.

[23] TURCRY Philippe, « Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.

[24] ADAM M.NEVILLE, Michel Pigeon ,« Propriétés des bétons », traduit par CRIB Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton SHERBOOKEL aval-éditions Eyrolles 2000-paris.

[25] Okamura H. and Ouchi M, «Self-Compacting C,oncrete. Development, present use and future», Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, 1999, Stockholm, Suède pp. 3-14.

[26] J-C.BRAQUENIER et J.DESNYTER, « le béton autoplaçant ou autocompactant », 2000.

[27] Z. ABIB, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », thèse de magister USTHB, 2004

[28] ROUIS F. « formulation et propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant a basse ciment pouzzolanique et (ou) ciment de laiter »

[29] Neubauer C.M., Yang M. And Jennings H.M. «Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspenions - effects of admixtures » Advanced Cement Based Materials, 1998, vol 8, pp. 17– 27.

[30] Agarwal S.K., Masood I. and Malhotra S.K., « Compatibility of superplasticizers with different cements » Construction and Building Materials, 2000, , pp. 253-259.

[**31] Tahar Ali – Boucetta**, « contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances » Université Badji Mokhtar-Annaba,2014

[32] Okamura, H., and Ozawa, K, «Mix-design for self-compacting concrete », Concrete Library of JSCE 1995; 25: 107-20.

[33] Okamura, H, " Ferguson lecture for 1996: self-compacting high-performance concrete ", Concrete International 1997.

[34]Okamura, H., and Ozawa, K, " Self-compacting High Performance Concrete ", Structural Engineering International 1996;

[35] Sedran, T, « Rheologie et rheometre des betons , Applications aux betons autonivelants », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Ponts et Chausses, France, 1999.

[36] Jin, J, « Properties of mortar for self-compacting concrete», Doctoral Thesis of University of London,United Kingdom, 2002.

[**37] Ouchi, M., Hibino, M., and Okamura, H**, " Effect of Superplasticizer on self compactability of Fresh Concrete ", Transportation Research Board, 76th annual meeting, Washington, D.C., 12-16 January, 1997.

[38] Tangtermsirikul, S., and Van, B.K, " Blocking criteria for aggregate phase of Self-Compacting high performance Concrete ", Proceeding of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, SC-4, Bangkok, Thailand, December 19-20, 1995; 58-69.

[39] Petersson, O., Billberg, P., and Van, B.K, " A model for self compacting concrete ", In: the International RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete. Bartos PJM, Marrs DL, Cleland DJ, editors, E&FN Spon, London, 1996; 484-92.

[40] Petersson, O., and Billberg, P, " Investigation on blocking of self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler ", Proceedings of the first International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 13-15 September, 1999; 333–44.

[41] EFNARC, «Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete », European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, EFNARC, Norfolk, UK, February 2002, 32pp.

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

[43] Sedran, T., and De Larrard, F, « Mix design of self-compacting concrete », Proceedings of theInternational RILEM Conference on Production Methods and Workability of Concrete, Paisley. Eds. P.J.M. Bartos, D.L. Marr, and D.J. Cleland, 1996; 439–50.

[44] De Larrard, F., Hu, C., and Sedran, T, " Best Packing and Specified Rheology: Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mix-Design ", Adam Neville Symposium, Advances in Concrete Technology, Las Vegas, June, 1995.

[45] Bensebti Salah Eddine, « Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux », Université Mentouri-Constantine, 02 Juillet 2008.

[46] Association Française de Genie Civil , « Bétons auto-plaçant : Recommandations provisoires » , documents scientifiques et techniques ,AFGC, juillet 2000.

[47] Skarendahl .A , Petersson .O , « self –compacting concert : State-of-art report of Rilm Technical Commite 174-SCC »,RILM Publications , France ,2001

[48] Benkali Sarah « Caractérisation exprimontales des bétons autoplaçant obtenus par ajout des déchets de construction » ,Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .

[49] T. Sedran k « Les betons autonivelants (BAN) », Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Mars-Avril, 1995.

[50] Assié Stéphan , « Durabilité des bétons autoplaçants », thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Toulouse, 2004, 149 p.

[51] Product Management de Holcim (Suisse) SA en collaboration avec l'EMPA Dubendorf, « Le béton autocompactant », 1er ère édition, 2005.

[52] The European Guidelines for self –compacting concrete ,specifications , production and Use /BIBM ,CEMUREAU/EFCA/EFNARC/ERMCO //MAY 2005

Www. efnarac.org /pdf /SCCGuidelinesMay2005.pdf

[53] Eric. P., Koehler. E.P., Fowler. D.W., " Aggregates in Self-Consolidating Concrete" ,Final Report ICAR Project 108. Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education (AFTRE). International Center for Aggregates Research (ICAR). The University of Texas at Austin,2007, 353p.

[54] Boeraeve. R. P., « Cours de Béton armé »,2009, 11p.

[55] Toma. G, « Comportement des bétons aux jeunes âges ». Thèse de PhD. Université Laval. Québec. Canada,1999, 264p.

[56] Esping. O., Löfgren. I, " Investigation of early age deformation in selfcompacting concrete", 2nd International Symposium on Advances in Concrete Science. Quebec. Canada,2006, PP: 11-15.

[57] Détriché. C.H. La maitrise de la fissuration précoce : Condition de la durabilité des ouvrages. PP : 107-128. In Baron. J., Olivier. J. P., 1996 – « La durabilité des bétons ». Ed. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris. France,1996.

[58] Esping. O,"Investigation of autogenous deformation in self-compacting concrete". International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete. Lyngby. Denmark , 2006,PP: 273-282.

[59] Haouas. A, « Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires », Caractérisation et modélisation chimico-hydro-mécanique du retrait. Thèse de doctorat. Ecole Normale de Cachan. Cedex. France,2007, 204p.

[60] Acher. P., Torrenti. J.M., Ulm. F.J, « Comportement du béton au jeune âge ». Ed. Lavoisier. Paris, France,2004, 186p.

[61] Gagné. R, « Durabilité et réparation des bétons », Université de Sherbrooke. Département de Génie Civil,2007, 62p.

[62] Fiches techniques, Tome 2, (Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre), Auteurs : CIM béton, Centre d'Information sur le Ciment et ses Applications, 2006,134 p.

[63] Guide pratique, Holcim Belgique, « Materials & Applications » Center Holcim Western Europe , 1ère édition,2007, 91 p.

[68] Bahloul Ouassila, « Propriétés mécaniques, physiques et durabilité *des* mortiers à base de Fibres cellulosiques *(cas* de l'alfa) », Ecole Nationale des Travaux publics, l'obtention du diplôme de Magister,2006 .

[65] BENKECHKACHE Ghofrane, « Etude de comportement differe des betons autoplacants Influence des paramétres de composition et de chargement », These de magister, Universite Mentouri constantine, novembre 2007

[66] BARR,B .,HOSEINIAN,S.B and BEYGI, M.A., « Shrinkage of concrete stored in natural environments : Cement and concrete composites», 25, pp 19-29,2003.

[67] LEHEMBRE.B,. "Guide des mktiers du bâ.timent, l'isolation et 1'étanchéitCnEdition Nathan, Paris, 1997.

[68] -BOLTON A.J, 'Watural fibers for plastic reinforcement ", Materials Technology 9, pp 12- 20, 1994.

[69] -LEAO, A.L., ROWELL,R., and TAVARES, N., "Applications of fibres in automotive industry in Brazil Therrnoforming process", Science and technology of polymers and advanced materiais, Edited by PRASSED, P.N et ai, Plenum Press, New York, 1998.

[70] GUILLAUME CAMPS , « Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton »,These doctorat de l'université de Toulouse ,soutenue le 10 Septembre 2008.

[71] Chanvillard G, « Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire », Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, OA12,1993.

[72] Association béton Québec en collaboration avec les manufacturiers de fibres métalliques et de fibres synthétiques, « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton», Janvier 2005.

[73]Rossi P, « Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées », Paris, 309p, 1998.

[74] HAOUARI H. "Contribution à l'étude du comportement du béton renforce de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques", Thèse de doctorat, INSA Lyon, France, 1993

[75] DREUX G., FESTA J. "Nouveau guide du béton et ses constituants" Edition Eyrolles, Huitième Edition, Mai 1998.

[76] CHAALAL O. : "Contribution à l'étude de durabilité des tiges en fibres de verre comme armature à béton", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC),Sept-Oct.1995.

[77] BARON J. et OLLIVIER J. P. "Les bétons bases et données pour leur formulation" Edition Eyrolles, 1996.

[78] BELFERRAG Allaoua, « Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes », Université KASDI Merbah de Ouargla, l'obtention du diplôme de MAGISTER, 20/06/2006.

[79] MULLER F. "Amiante, Notion essentielles", LAIMT 67, nov. 2003.

[80] Abdellah Hillali , « Etude experimentale de la rheologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP) : Influence du fines calcaires et dess fibres végétales »,université de Cergey-pontoise , 17 Décembre 2009

[81]: W.D. Calliste Jr., '' Science et Génie des matériaux '', Edition Dunod, Mont-Royal, Québec, p. 463..2001.

[82] ABSI, E, « Béton de fibres, synthèse des études et recherches réalisées au CEBTP », Annales de l'ITBTP N°520, 1994.

[83]. BERNIER, G. « Composition, rhéologie, mise en œuvre et composition du béton de fibres métalliques » C.R. journées ENS CACHANMRES 22-25 nov.1988, Composite cement fibre ; 19p

[84] PAILLERE, A.M,« Le béton de fibres métalliques état actuel des connaissances », Annales de l"ITBTP N°515, 1993.

[85] SWAMY, R.., "the effectiveness of steel fiber as shear reinforcement". USA. Concr. Inst. Des. Const., vol.7, n°3, 1985.

[86] BERNIER, G. « Caractérisation et contrôle des bétons renforcés de fibres », Annales de l"ITBTP N°494, 1991

[87] ZHAN, Z, « Contribution au dimensionnement des pieux en béton de fibre » Thèse de doctorat, université d"Orléans, 1991.

[88] ROSSI, P, « Le développement industriel des bétons de fibres métalliques – Conclusions et recommandations », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.

[89] DJEBALI Saïd, « CARACTERISATION DES ELEMENTS DE STRUCTURES

EN BETON DE FIBRES METALLIQUES », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZO, 22 / 06 / 2013.

[**90] SWAMY, R.N., BAHIA, H.M.**, "The effectiveness of steel fiber as shear reinforcement". USA. Concret. Inst. Des. Const., vol.7, n°3, 1985.

[91] MAMILLAN, M.; MINARD, J, « Béton de fibres d'acier », Recherche n°91-1015, CEBTP, octobre 1987.

[92] KRENCHEL, H., " Fiber reinforcement", Academisk Forlag , Copenhagen, 1988,

[93] DEHOUSSE, N ,«Fiber reinforced cement and concrete» , RILEM SYMPOSIUM, GB. The construction press L.T.D. ed. Adam Neuilly 1975.

[94] RAMAKRISHAN, V. OBERLING, G., TATNAL, P.C, " Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete", Rapport de recherché 1987.

[95] CUYKENS T., VANSTERMANS J, « Bétons de fibres en acier », Extrait de C.S.T.C. Revue N°3, Septembre 1977.

[96] ELHACHEM, M « Etude de l'influence de la fibre de fonte sur le fluage et le retrait du béton ». Thèse de docteur de l"E.C.P. février 1990.

[97] VALADE, TH, « Comportement des bétons armés de fibres métalliques ». Mémoire de recherche développement, ENS de CACHAN, Déc. 1987.

[98] NARAYANAN, R, DARWISH, Y.S," Use of steel fiber as shear reinforcement". ACI structural journal, n°84, s23, pp 216-227, May- June 1987.

[99] NEMEGEER, D. DRAMIX, « fibres d'acier pour le renforcement du béton ». C.E.R.I.L., stage n°6, Fév.1991.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[111] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, «Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading», Composites Science and Technology 67, 1627-1639.

[112] Baley C, « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », Les techniques de l'ingénieur » , AM 5 130, 2004.

[113] Mohammad Dalour Hossen Beg, «The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fabre Reinforced Polypropylene Composites»,Thèse de doctorat, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2007.

[114] K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, « Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin », revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.

[115] M.Nardin, « interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales », revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006.

[116] F. Michaud, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage », thèse Phd, univ Laval, 2003.

[117] F.Laurans, A.Déjardin, J.Pilate, ''Physiologie de la formation des parois de fibres de bois'', composites et matériaux avancés, Vol.16, pp.27-39,2006.

[118] KRIKER A. "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climats chaud et sec", Thèse de doctorat d'état, ENP, Algérie, 2005.

[119] 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.

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

[121] AYYAR, T.S.R. and MIRIHAGALLA, P.K., " Elephant grass fibers and reinforcing fiber".Magazine of Concrete Research , Vol. 28, pp.162-67, 1976.

[122] BLEDZKI, A. K and GASSAN. J, «Composites reinforced with cellulose based fibers », ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, , 1999.

[123] S. Abdelaziz, A. Bouaziz, R. Hamzaoui, A. Bennabi, « Valorisation des tiges de dattiers dans la formulation des mortiers : propriétés physiques et mécaniques », Laboratoire Université de Biskra, BP 145 RP 07000, Biskra, Algérie

[124] KRIKER A., DEBICKI G., BALI A., KHENFER MM, CHABANNET M, «Mechanical properties of date palm fibers and concrete reinforced with date palm fibers in hot-dry climate», Cement and Concrete Composites, vol. 27, n° 5, 2005, p. 554-564.

[125] BENMANSOUR N., BOUDJMMA A., GHERABLI A., KARACHE A., BOUDENNE A., «Etude des propriétés thermophysiques et mécaniques de nouveaux

omposites à base de palmiers dattiers et de béton» (accepté), *XIème colloque interuniversitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes*, Reims, 3-5 juin 2013.

[126] BEDRINA M., LAIDAOUI B., GOULLIEUX A., MM. KHENFER, BALI A., QUENEUDEC M., «Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concrete», *Construction and Building Materials*, vol. 23, 2009, p. 1311-1315.

[127] Adil Sbiai, « Materiaux composites a matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : Effet de l'oxydation au tempo sur les fibres », l'institut national des sciences appliquées de Lyon, le 03 juin 2011.

[**128] BEZATO Tsaranofy Zita Fredo**, « LES PALMIERS DATTIERS « *Phoenix dactylifera »* À TOLIARA : ÉTUDE DE LA FILIÈRE, UTILISATION ET DIVERSITÉ VARIÉTALE », UNIVERSITÉ DE TOLIARA, le 25 juillet 2013.

[129] TAALLAH Bachir , « Etude du comportement physico-mecanique du bloc de terre comprimée avec fibres », Université Mohamed khider – Biskra , le 14 Décembre 2014.

[130] KARECHE Abdelhak, « Étude des matériaux à base de bois de palmier dattier : durabilité, dégradation et propriétés structurales et de transfert », UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA, le 03 février 2014

[1312] Couhert .C, « Pyrolyse flash à haute température de la biomasse lignocellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse », Thèse de pour obtenir le de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Energétique.2007.

[132] S, Berlioze, « Etude de l'estérification de la cellulose par une synthèse sans solvant. Application aux matériaux nano composites », thèse doctorat de l'université JOSEPH FOURIER, Sciences des Polymères, 2008

[133] C.Satge, « Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides », thèse doctorat de l'université de limoges, chimie des substances naturelles, 2002.

[134] N.Joly, « synthèse et caractérisation de nouveaux films plastiques obtenues par acylation et réticulation de la cellulose », thèse doctorat de l'université de Limoges, chimie des substances Naturelles, 2003.

[135] D, Hatsch « Interaction hôte/pathogène : étude du modèle Cumulus lupulus Fusarium graminearum. Identification, génomique et transcriptomique du pathogène », thèse de doctorat de l'université de Louis Pasteur Strasbourg I, Sciences du Vivant – Aspects moléculaires et cellulaires de la biologie.2004.

[136] B.R. Sharma, Naresh L., N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C. Merchant Lucid ,"Colloids Limited Jodhpur-342005", Rajasthan, India,2006.

[137] P, Boustingorry,"Élaboration d'un matériau composite à matrice gypse renforcé par bois fragmenté -amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqué en gypse," thèse de doctorat de l'école Nationale Supérieure des Mine de Saint Etienne, Génie des procédés, 2002

[138] Yahiaoui Lamia, « Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss) », UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIFUFAS (ALGERIE), 2011.

[139] G. Promis1, A. Gabor1, P. Hamelin, "Behavior of beams made in textile reinforced mineral matrix composites" Comptes Rendus des JNC 16 ¾ Toulouse, 2009.

[140] G.H.D. Tonoli, U.P. Rodriguez Filho b, H. Savastano Jr. c, J. Bras d, M.N. Belgacem d, F.A. Rocco Lahr ''Cellulose modified fibres in cement based composites'', Composites: Part A 40 2046–2053.2009.

[141] F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse Phd, univ Laval, 2003.

[142] F.Gouanvé, S.Marais, M. Métayer,' composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin'', composites et matériaux avancées, Vol.16, pp.117.128 ,2006.

[143] Hamada, H., Ikuta, N., Nishida, N., Maekawa, Z. Effect of interfacial silane network structure on interfacial strength in glass fibre composites, *Composites,* 1994, v.25, p.512.

[144] Taha, I., Steuernagel, L., Ziegmann, G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.669-684.

[145] Balnois, E., Busnel, F., Baley, C., Grohens, Y. An AFM study of the effect of chemical treatments on the surface microstructure and adhesion properties of flax fibres. *Composite Interfaces,* 2007, v.14, n.7-9, p.715-731.

[146] Joshy, M. K., Mathew, L., Joseph, R. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isora fibre reinforced polyester composites. *Composite Interfaces,* 2007, v.14,

[147] Goussé, C., Chanzy, H., Excoffier, G., Soubeyrand, L., Fleury, E. Stable suspensions of partially silylated cellulose whiskers dispersed in organic solvents. *Polymer* 2002, v.43, p.2645-2651.

[148] Abdelmouleh, M., Boufi, S., Belgacem, M., N., Dufresne, A., Gandini, A., . Modification of cellulose fibers with functionalized silanes: Effect of the fiber treatment on the mechanical performances of cellulose-thermoset composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, v.98 n.3, p.974 - 984.

[149] Haseena, A. P., Unnikrishnan, G., Kalaprasad, G. Dielectric properties of short sisal/coir hybrid fibre reinforced natural rubber composites. Composite Interfaces, 2007, v.14, n.7-9, p.763-786.

[150] Kalia, S., Kaith, B.S., Kaur, I. . Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composite - A review. *Polymer Engineering and Science,* 2009, v.49, n.7, p.1253-1272.

[151] J.H. Savastano, P.G. Warden et R.S.P. Coutts, "Brazilian waste fibers as reinforcement for cement-based composites", Cement and Concrete Composites, pp. 379-384, 2000.

[152] A.Djoudi, M.M, khenfer, A .Bali " Etude d'un nouveau composite en plâtre Renforcé avec les fibres'' du SBEIDCO – 1st International Conférence on Sustainable Built Environnement Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[153] O. Bahloul, A. Bourzam, A. Bahloul, « Utilisation des fibres végétales dans le renforcement de ciment (Cas d'Alfa)»SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.

[154] D Sedan, ''Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composites'', thèse doctorat de l'université de limoges, matériaux céramiques et traitement de surface, 2007.

[155] C,S,Peyratou ,M,L,Troede,T,Chotard, J,P,Bonnet,A,Smith," Modification Physico-chimique des interactions entre les fibres de la chanvre et la chaux: impact sur les propriétés mécaniques des mortiers",18eme congrès français de mécanique, Grenoble,2007.

[156] Moselmi, Ziengtian, ‘’influence of chemical additives on the hydratation characteristics of western larch wood –cement -water mixture’’, 1985, Forest product journal 35(7)37-43.

[157] C.R. Wilding, A. Walter et D.D. Double, “A classification of inorganic and organic admixtures by conduction calorimetry”, Cement and Concrete Research, 1984, pp. 185-194

[158] M. Arsene, K. Bilba et A. Ouensanga, "Influence des constituants de la fibre de bagasse sur la prise du matériau composite bagasse/ciment ", Revue des composites et des matériaux avancés, pp. 7-20,2001**.**

[159] Boukendakdji, O, “ Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton auto plaçant : Optimisation des conditions opératoires ”, Thèse de doctorat de l’Université Saad Dahleb de Blida, Algérie, 2010.

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

[160] 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.

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

[162] A.K. Bledzki, J. Gassan, 1999; Composites reinforced with cellulose based fibres; Prog.Polym. Sci. 24, 221-274.

[163] granulats, sols, ciment et bétons (caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire) : août 2004-N° 407176

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

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

[166] Bouhamou N., Belas N., Mebrouki A., Mesbah H. et Ammar Y. « Etude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux » Sciences Technologies et Développement, ANDRU, 2007, N°2, pp. 31-49.

[167] MOKHTARI ABDESSAMED : Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier Mémoire de magister de l'Université. e KASDI MERBAH OUARGLA

[168] EN 196-1, *méthodes d'essais de ciment*, AFNOR,France 1994

[169] CEN EN 196-1 : Norme Française CENEN 196-1 « Méthode d'essais des ciments, partie I : «Détermination des résistances mécanique » AFRON, Paris, Août 1995

[170] Z.E.Abib, « Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçants », Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Juillet 2004.

[171] Abdou Kamel << *Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire* >> thèse *de* doctorat d'Université MENTOURI – CONSTANTINE 2007

[172] Z.E.Abib, « Formulation et Caractérisation des Bétons Autoplaçants », Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene USTHB, Juillet 2004.

[173] 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.

[174] 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.

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

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

[177] 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[192] Sumit Chakraborty, Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical , Construction and Building Materials 49 (2013) 214–222

and mechanical characteristics of cement mortar

[193] Taha, I., Steuernagel, L., Ziegmann, G. Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 2007, v.14, n.7-9, p.669-684.

[194] M. Merzoud, M.F. Habita, A. Gouasmia,'' Influence d'un traitement Hygrothermique sur les caractéristiques Physico-mécaniques de composites cimentaire à base de Diss'', 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009

[195] G.H.D. Tonoli, U.P. Rodriguez Filho b, H. Savastano Jr. c, J. Bras d, M.N. Belgacem d, F.A. Rocco Lahr « Cellulose modified fibres in cement based composites », Composites: Part A 40 2046–2053.2009.

[196] T.Mahmoud,'' étude de matériaux renforcés par des fibres organique en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts **''** thèse de doctorat, Institut nationale des sciences appliqués de Lyon, Génie Mécanique, 2005.

[198] J.M. Faulstich.de Paiva, E. Frollini. Unmodified and Modified Surface Sisal Fibers as Reinforcement of Phenolic and Lignophenolic Matrices Composites: Thermal Analyses of Fibers and Composites Macromol, Material and Engineering, 291, 2006, 405-417

[197] A.K. Mohanty, M.A. Khan, G. Hinrichsen, Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/Biopol composites, Composites Science and Technology, 60, 2000,1115-1124.

[198] Reyne, M. Technologie Des Composites, Traité des nouvelles technologies. *Série Matériaux ; Hermès,* 1990, v.13.

[199] Reyne, M. Technologie Des Composites, Traité des nouvelles technologies. Série Matériaux ; Hermès, 1990, v.13.

[200] EDGINGTON J., HANNANT D.J., WILLIAMS R.I.T, Steel fiber reinforced concrete. », G.B. Building 1974.

[201] HOUARI H., Etude de l'influence de la fibre métallique sur le fluage et la fatigue dubéton, Séminaire National de Génie Civil, Guelma, Algérie, 24-25 Oct. 1994, 10p.

[202] ARABI. N, REDEL. B, MELINGE. Y, JAUBERTHIE.R. International "Alkali resistant glass fibre reinforced cementations materials for patching applications"Proceedings of 1st Concrete Conference one to repair, France 15-17 JULY? 2003.

[203]ELHACHEM M., « Etude de l'influence de la fibre de fonte amorphe sur le retrait et le fluage du béton », Thèse Doct., Ecole Centrale Paris, 1990, 165p.

[204] ARABI. N, REDEL. B, MELINGE. Y, JAUBERTHIE.R. International "Alkali resistant glass fibre reinforced cementations materials for patching applications" Proceedings of 1st Concrete Conference one to repair, France 15-17 JULY? 2003.

[205] SEMMANA Oualid , DAHMANI Hamza : comportement des bétons autoplaçants a base des fibres plastiques , mémoire de master 2014 ,université de médea

Annexes





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.



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 IIA 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), **(NA 5042)**:	7.00 – 9.50
Résidus insolubles (%), **(NA 5042)**:	1.5– 3.0
Teneur en sulfates SO_3 (%), **(NA 5042)**:	2.00 – 2.50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%) :	1.90 – 2,30
Teneur en chlorures (%), **(NA 5042)**:	0,01 – 0,03

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C_3S (%) :	58.00 – 64.00
Aluminates tricalciques C_3A (%) :	6,0– 8,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%) :	25,5 – 28,00
Finesse suivant la méthode de Blaine **(NA 231)**:	4300 – 4 800
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,5 – 2.5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	120 - 180
Fin de prise (min)	210 - 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (Mpa)	> 20
28 jours (Mpa)	≥ 42.5 & 62,5

Algerian Cement Company (SPA)
33, Rue des Pins. Hydra. Alger, Algérie
Tél.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

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

FICHE TECHNIQUE DU L'ADJEUVANT UTILISE (MEDAFLOW145)

NOTICE TECHNIQUE 1101

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 :TAB 1 ,TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.
Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité ..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore ..... < 1g/L
- Extrait sec ..... 30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR** .

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Précaution d'emploi:
Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur notre site web : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

Granitex
Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

Notice Technique
Édition Août 2011
Numéro 9.10T
Version n° 96.2011
Sikadur® 32 LP

Construction

Sikadur® 32 LP (ex Sikadur® Imprégnation)

Imprégnation époxydique à 2 composants sans solvant

Présentation	Le Sikadur® 32 LP se présente sous forme d'un kit prédosé comprenant : ■le composant A (résine couleur blanche) ■le composant B (durcisseur de couleur grise) Après mélange, on obtient une pâte grise.
Domaines d'application	■Imprégnation qui permet des collages jointifs sans épaisseur, tout en assurant une étanchéité parfaite et rapide. ■Collage de béton frais sur béton ancien, reprise de bétonnage. ■Collage par couche mince de béton durci sur béton durci, acier sur béton. ■Accrochage d'enduits au mortier de ciment sur : béton même lisse ou humide, fers ou aciers traités, bois. ■Traitement de surface antipoussière et anti-usure pour sols industriels. ■Régénération des supports poreux et friables. ■Couche d'adhérence pour toutes résines ou mortiers époxydiques sur bétons et mortiers lisses ou humides.
Caractères généraux	■Très forte adhérence sur la plupart des supports : béton, mortier, pierres, briques, amiante-ciment, aciers et métaux, verre et matériaux synthétiques. ■Étanche aux liquides et à la vapeur d'eau. ■Résiste bien aux agents chimiques usuels à température ambiante : acides peu concentrés, bases, sels et saumures, eaux très pures, eaux usées, huiles et carburants. ■Ne contient pas de solvant. ■Utilisable même sur des supports humides. ■Durcit sans rester poisseux, même lorsque l'air est humide. ■Résistances mécaniques élevées. ■Conforme à la norme NF P18870 comme produit de collage structural de classe 1.
Caractéristiques	
Coloris	Gris
Conditionnement	Kit prédosé de 0,9 kg
Stockage	Stocker à l'abri de l'humidité et du gel.
Conservation	Dans son emballage d'origine intact, à une température comprise entre +5°C et +30°C, le Sikadur® 32 LP se conserve 1 an. Du fait du stockage en-dessous de 20°C, des cristaux peuvent apparaître dans le composant B et le composant A peut se figer. Il convient de le réchauffer avant mélange, au bain-marie de préférence.

Construction

Données techniques

Densité

Densité de l'imprégnation (mélange A + B) : 1,1.

Résistances mécaniques

A 20°C :
- à la compression : 80 MPa,
- à la traction par flexion : 40 MPa,
- allongement à la rupture : 4 %.

Les résistances mécaniques sont proches de leur maximum au bout de 4 jours à 20°C.

Conditions d'application

Proportions du mélange

(A/B) : 3/2 en poids ou en volume.

Consommation

Variable selon la rugosité du support et sa température : 0,2 à 0,5 kg/m^2.

Préparation du support

- Le support doit être propre, sain, sec et débarrassée des parties non adhérentes.
- Il doit avoir au moins 28 jours.
- Dans le cas de support métallique, décaper les pièces par grenaillage, sablage ou au disque abrasif.

Mise en œuvre

Conditions d'utilisation

La température optimale d'application est comprise entre + 10°C et + 50°C.
La température du support doit être supérieure à +5°C.

Préparation du mélange

- Le Sikadur® 32 LP est livré en kit prédosé.

Vider complètement le composant B dans le composant A (grand emballage).
- Mélanger les 2 composants pendant 3 à 5 minutes, de préférence avec un agitateur électrique ou pneumatique à faible vitesse de rotation (moins de 300 tours/minute).
- Laisser reposer 10 minutes.

Nettoyage des outils

- Les outils seront nettoyés avant durcissement de la résine avec le Nettoyant Sikadur® (notice technique n° 6.90).
- A l'état durci, le produit ne peut être éliminé que par voie mécanique.

Mise en oeuvre

- Appliquer le mélange en couche mince à la brosse, au rouleau ou au pistolet pulvérisateur.
- Sur surface humide, frottasser longuement pour bien faire pénétrer le mélange.
- La reprise de bétonnage ou tout apport sur sous-couche Sikadur® 32 LP doit être réalisé pendant que cette couche est encore poisseuse (à 20°C : 8 heures maximum).

Durée Pratique d'Utilisation

10°C	20°C	40°C
12 h	5 H	2H

La durée pratique d'utilisation diminue lorsque la température ou la quantité de produit préparé augmente.

Précautions

Chez certaines personnes, les résines époxy et les durcisseurs peuvent engendrer une irritation de la peau et des muqueuses.
Le Sikadur® 32 LP est un produit inflammable contenant des solvants aromatiques. Il doit être utilisé en e
xtérieur.

Mentions légales

Les informations contenues dans la présente notice et en tout autre conseil sont fournis en toute bonne foi, et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. Les informations s'appliquent uniquement aux modalités d'application et produits expressément visées par la présente notice. En cas de modification des paramètres d'application, tels que des changements de substrats etc, ou dans le cas d'une application différente, veuillez consulter nos agences avant d'utiliser les produits Sika. Les informations contenues dans la présente notice ne suspense pas l'utilisateur des produits de vérifier dans un essai sur site leur adaptation à l'application et à l'objectif envisagés. Toutes les commandes sont soumises à nos Conditions Générales de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.

Construction

Sika Tunisienne
Zone Industrielle.
2086 Douar Hicher.
Tunisie

Tel : (+216) 71 545 533 / (+216) 71 546 330
Fax : (+216) 71 547 130
Site web : www.sika.com.tn
e-mail : sika.tunisienne@tn.sika.com

PROGRAMME DE CALCULE LES QUANTITES EXIGENCES POUR DES MAP

Essais sur Mortier					entrer data dans cellules en rouge	
					valeurs calculées dans cellules en noir	
Référence du mélange	**Essai 1**	CEM II 42,5 sans ajout			Date	10/05/2006
volume de mortier (litres)	**2.6**					
sable/mortier vol	0.45					
E/P par vol.	1.260	poudre vol (%)	24.34	Eau volume (%)		30.66
composition Poudre(vol %)		type				
ciment portland	100					
Laitier	0					
Fumée de Silice	0					
Pouzolane	0					
superplast - MEDAFLOW145	0.7	% (Sp/P)				
humidité sable						
		humidité (%)	absorption (%)	correction (%)		
poids humide (gms)	200	**0.0**	1.2	**-1.2**		
poids sec (gms)	200					

Materiaux/Type	vol	densité		contenance d'eau		poid mélange				
	litres	kg/m^3	kg	%	kg	kg				
ciment	0.633	3150				1.993				
Laitier	0.000	2857				0.000				
						0.000				
						0.000				
Eau	0.797	1000	0.797			0.824	W1	0.495		
			total				W2	0.330		
superplast - MEDAFLOW145		1065	0.014	70	0.010	0.014				
			ssd						S0/3	2.122
Sable	1.170	2622	3.068	-1.2	-0.037	3.031			S r	0.909
Total	2.600					5.862				
		w/p bt wt =	0.4000							

Résultats du diamètre d'étalement pour mortier autoplaçant de fibre végétale



Témoin



Dosage 0.5%



dosage 1%



Dosage 1.5%



dosage 2%



Dosage 2.5%



dosage 3%

Dégradation des éprouvettes



Dosage 0.5%



Dosage 1.5%



Dosage 2%



Dosage 3%



Tous les dosages

Résultats de traction (28j)



MAP1



MAP2





MAP3





MAP4




MAP5






MAP6

Résultats de compression (28j)




MAP1




MAP2




MAP3






MAP4





MAP5





MAP6