



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux

THEME

**Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales
sur les propriétés des bétons autoplaçant (BAP) à
l'état frais et durcis**

Dirigé par :

Pr. RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE

Mme. DJEBRI NOURA

Présenté par :

KOUICI ABIR

Promotion : 2015/2016.

Résume :

L'utilisation des Bétons autoplaçant (BAP) c'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques et rhéologiques. L'incorporation des fibres dans la composition du béton autoplaçant (BAP) à un intérêt qui mérite d'être étudié.

L'objectif de ce travail, c'est la valorisation des ressources naturelles telles que les fibres végétales en les utilisant comme renfort du béton autoplaçant. Pour réduire l'impact environnemental et améliorer le comportement mécanique du béton à la flexion, compression.

Dans ce travail, nous avons étudié l'effet de l'introduction des fibres d'Alfa dans un béton autoplaçant. Ainsi que l'influence du traitement chimique par 3% de NaOH. Les résultats des tests sur les différentes éprouvettes en bétons autoplaçants renforcés par ces fibres, montrent que la solution NaOH à un effet significatif sur les propriétés rhéologiques et mécaniques (le comportement à la flexion trois points et compression). Les résultats de ce travail suggèrent que les fibres d'Alfa sont comparables à d'autres fibres naturelles utilisées comme renfort dans des bétons. Elles sont complètement aptes à l'utilisation comme renfort dans les bétons autoplaçants.

Mots clés : renforcement, fibres végétales, traitement chimique, béton autoplaçant, fibres d'Alfa, comportement mécanique.

Abstract

Use of Self-Consolidating Concrete (BAP) that has grown rapidly in recent years and increasing attention is paid to the study of their mechanical and rheological properties. The incorporation of fibers in the composition of self-compacting concrete (BAP) an interest that deserves to be studied.

The objective of this work is the development of natural resources such as plant fibers using as reinforcement of SCC. To reduce environmental impact and improve the mechanical behavior of concrete in bending, compression.

In this work, we studied the effect of the introduction of Alfa fibers in placing concrete. And the influence of chemical treatment with 3% NaOH. The results of tests on different specimens compacting concrete reinforced with these fibers show that the NaOH solution to a significant effect on the rheological and mechanical properties (behavior at the three-point bending and compression). The results of this work suggest that Alfa fibers are comparable to other natural fibers used as reinforcement in concrete. They are fully suitable for use as reinforcement in self-compacting concrete.

Keywords: reinforcement, vegetales fibers, chemical treatment, self-compacting concrete, Stipa Tenacissima fibers.

ملخص:

استخدام خرسانة ذاتية التسوية. نمت بسرعة في السنوات الأخيرة، أدت إلى المزيد من الاهتمام لدراسة خصائصها الميكانيكية والانسحابية. وإدماج الألياف في تكوين-ضغط نفس الخرسانة مصلحة تستحق ان تدرس.

الهدف من هذا العمل، هو استغلال الموارد الطبيعية مثل الألياف النباتية باستخدامها كتعزيزات ملموسة في خرسانة ذاتية التسوية، لتقليل الأثر البيئي وتحسين السلوك الميكانيكية الخرسانة في الانحناء والضغط.

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير ادخال اليف الحلفاء على الخرسانة ذاتية التسوية، بالإضافة إلى ذلك تأثير المعالجة الكيميائية ب 3% من هيدروكسيد الصوديوم. وأظهرت نتائج الاختبارات على عينات مختلفة من الخرسانة ذاتية التسوية المدعمة بألياف ان محلول هيدروكسيد الصوديوم له تأثير كبير على سلوك هذه المواد في تجربة الانحناء الثلاثي وتجربة الضغط.

نتائج هذه الدراسة تشير إلى ان اليف الحلفاء يمكن مقارنتها مع الاليف الطبيعية الأخرى المستخدمة كتعزيز في الخرسانة ذاتية التسوية، فهي مناسبة تمام لاستخدامها كتعزيز في الخرسانة ذاتية التسوية.

Sommaire :

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I :Généralités sur le béton autoplaçant

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	4
I.3 Définition	4
I.4 Les avantages des bétons autoplaçants	5
I.5 Concept du béton autoplaçant	5
I.6 .Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais	6
I.7 Les constituants d'un BAP	8
I.8 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais	16
I.9 Caractérisation d'un béton auto plaçant a l'état durci	24
I.10 Méthodes de formulations des BAP	26
I.11 Domaine d'utilisation des BAP	28
I.12 Fabrication, transport des BAP	30
I.13 Conclusion.....	31

Chapitre II: Bétons de Fibre

II.1 Introduction	32
II.2 Définition de béton de fibres	32
II.3 Les fibres.....	33
II.4 Bétons autoplaçants fibres	46
II.5 Conclusion	52

Chapitre III : Généralités sur les fibres végétales

III.1. Introduction	53
III.2. Définition des fibres naturelles	53
III.3.Classification des fibres naturelles	53
III.4. Définition de la fibre végétale	54

III.5. Les différents renforcements à base de fibres végétales	58
III.6. L'utilisation des fibres végétales dans le domaine de génie civil	64
III.7. Conclusion.....	64

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux utilisés

IV.1 introduction.....	65
IV. 2 Caractéristiques des matériaux utilisées.....	65
IV.2.1 Sable	65
IV.2.2 Gravier	76
IV.2.3 Le ciment	83
IV.2.4 Les Adjuvants	85
IV.2.5 Le filler utilisé (marbre)	86
IV.2.6 L'eau de gâchage	87
IV.2.7 Fibres d'Alfa	87

Chapitre V : Techniques expérimentales :

V.1. Introduction	91
V.2. Formulation du béton autoplaçant	91
V.3 Procédure de fabrication des éprouvettes	93
V.4. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	94
V.5. Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8	94
V.6. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci	100
V.7 Confection des éprouvettes	102
V.8 Conclusion :	103

Chapitre VI : Résultats et analyses

VI .1.Introduction.....	105
VI.2. Présentation de résultats à l'état frais.....	105
VI.3. Présentation de résultats à l'état durci.....	109
VI.4. Conclusion	126

Conclusion générale

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE

Liste des tableaux :

Chapitre I : Généralités sur le béton autoplaçant

Tableau I-1: Classes granulaires.	11
Tableau I-2: Granulats naturels	12
Tableau I-3: Propriétés d'ouvrabilité des BAP	17
Tableau I-4: Classes d'étalement	18
Tableau I-5: Classes de la viscosité apparente - t50.....	18
Tableau I-6: Classes de viscosité apparente -V –funnel	19
Tableau I-7: Classes d'aptitude à l'étalement à l'anneau.....	21
Tableau I-8: Classe l'aptitude à l'écoulement	22

Chapitre II :Bétons de Fibre

Tableau II -1: Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées	36
---	----

Chapitre III : Généralités sur les fibres végétales

Tableau III-1:Propriétés usuelles des fibres végétales	56
Tableau III-2: Composition chimique de quelques fibre végétales.....	57
Tableau III-3: Principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales.....	58

Chapitre IV : Caractérisation des matériaux utilisés

Tableau IV-1: Classification des sables suivante leur grosseurs	65
Tableau IV-2: Classification des sables suivant la valeur de module de finesse.....	66
Tableau IV-3: La masse volumique absolue de sable	67
Tableau IV -4: La masse volumique apparente à l'état lâche	67
Tableau IV-5: La masse volumique apparente à l'état compact du sable	68
Tableau IV-6: Porosité, compacité et l'indice des vides	68
Tableau IV-7:Classification de la nature de sable en fonction d'E.S.....	71
Tableau IV-8: Equivalent de sable	71
Tableau IV-9: Teneur en eau de sable	72
Tableau IV-10: Degré d'absorption du sable Boussaâda	72
Tableau IV-11: Degré d'absorption du sable Boussaâda	74
Tableau IV-12: Les caractéristiques chimique de sable	75
Tableau IV -13: Masse volumique apparente du gravier	77
Tableau IV -14: La masse volumique absolue du gravier	78
Tableau IV-15: Porosité, compacité et l'indice des vides	78
Tableau IV-16: Degré d'absorption d'eau du gravier.....	79
Tableau IV-17: Teneur en eau des graviers.....	79

Tableau IV-18: Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	80
Tableau IV-19: Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	80
Tableau IV-20: Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	82
Tableau IV-21: Classification des roches en fonction du coefficient L_A	82
Tableau IV-22: Analyse chimique du gravier	83
Tableau IV-23: Caractéristiques physique du CPJ-CEM/42.5.....	84
Tableau IV-24: Les compositions chimiques du CPJ.....	84
Tableau IV-25: Les compositions minéralogiques du CPJ	84
Tableau IV-26: Propriétés chimiques et physiques de SUPERIORE 126.....	85
Tableau IV-27: Caractéristiques physiques du marbre	86
Tableau IV-28: Caractéristiques chimiques du marbre	86
Tableau IV -29: Caractéristique chimique d'eau	87

Chapitre V : Techniques expérimentales :

Tableau V-1: Les compositions d'u 1m ³ de béton	92
--	----

Chapitre : Résultats et analyses

Tableau VI -1 : Caractéristiques rhéologiques du BAP.....	105
Tableau VI-2 : Résultats d'essais sur le béton frais.....	106
Tableau VI -3 : Caractéristiques mécaniques du BAP	109
Tableau VI-4: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues et courtes) : pourcentage de 0.1%.....	110
Tableau VI-5 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues et courtes) : pourcentage de 0.15%.....	111
Tableau VI-6: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités longues et courtes) : pourcentage de 0.1%.....	112
Tableau VI-7 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités longues et courtes) : pourcentage de 0.15%.....	114
Tableau VI -8: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues) pourcentage de 0.1%et 0.15%.....	116
Tableau VI -9: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités courtes) : pourcentage de 0.1%et 0.15%.....	117
Tableau VI -10 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités longues) : pourcentage de 0.1%et 0.15%.....	119
Tableau VI -11 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités courtes) : pourcentage de 0.1%et 0.15% 120	

Tableau VI -12 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités et non traités longues).....	122
Tableau VI -13: Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités et traités courtes).....	124
Tableau VI-14 : Résultats du module d'élasticité.....	125

Liste des figures :

Figure I-1: formulation qualitative du BAP	6
Figure I-2: Action des super-plastifiant Défloculation des grain de ciment	6
Figure I-3: Influence de la qualité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton	7
Figure I-4: Les utilisations des super-plastifiants	14
Figure I-5: Illustration de l'effet filler	15
Figure I- 6:Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton	16
Figure I-7: Essai d'étalement	18
Figure I-8:L'essai d'écoulement au V-Fennel.....	19
Figure I-9: Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures.....	20
Figure I-10: Essai d'étalement a l'anneau (J-ring)	20
Figure I-11: Essai à la boîte en L	21
Figure I-12: Essai de stabilité au tamis.....	22
Figure I-13: Laitance en périphérie de la galette d'étalement.....	23
Figure I-14: Essai de ressuage.....	23
Figure I-15: Mesure de la résistance à la compression.....	24
Figure I-16: Mesure de la résistance à la traction par flexion	25
Figure I-17: Comparaison des modules élastiques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	25
Figure I-18: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation	26
Figure I-19: Le pont Akashi Kkaikyo	29
Figure I-20: La tour Landmark Tower	30
Figure II-1:Modèle de composite à base des fibres.....	33
Figure II-2: Rôle des fibres dans la matrice de béton	33
Figure II- 3: Différentes formes géométriques de fibres métalliques	38
Figure II-4: Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	39
Figure II-5: Principe de couturassions d'une fissure	40
Figure II-6: Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibre	40
Figure II- 7: Processus de fissuration du béton	41
Figure II-8: Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite	42
Figure II-9: Role des fibres dans le controle de fissuration du béton	42
Figure II-10: Exemple de fibres macro-synthétiques utilisées en protection contre les incendies.....	43
Figure II-11: Exemple de fibres métalliques.....	44
Figure II-12: Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macro fissures.....	45
Figure II-13: Effets des fibres sur l'étalement des BAP.....	47
Figure II-14: Courbe effort-flèche pour différentes compositions.....	49
Figure II-15: Comportement à la traction de différentes compositions	50
Figure II-16: Palplanches précontraintes à base de mortier autoplaçant fibré (a), béton armé ordinaire (b).....	51

Figure II-17: Un voussoir à base de BAP fibré.....	52
Figure III-1: Classification des fibres naturelles selon à l'origine.....	53
Figure III-2: Classification des fibres végétales selon l'origine.....	55
Figure III-3: Différents constituants d'une fibre végétale.....	56
Figure III-4: Plante de chanvre et les fibres de chanvre.....	59
Figure III-5: Plante du lin et les fibres de lin.....	59
Figure III-6: Plante et fibres naturelles de coton.....	60
Figure III-7: Plante de l'abaca et fibres de l'abaca.....	60
Figure III-8: Plante de kenaf avec ces fibres.....	61
Figure III-9: Jute :(a) plante, (b) tisse, (d) fibre.....	61
Figure III-10: fibre naturelles du sisal.....	62
Figure III-11: Plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie.....	62
Figure III-12: Fibre naturelles de la plante du coco.....	63
Figure III-13: Palmier et les fibres de palmier dattier.....	63
Figure III-14: Plante et les fibres l'Alfa.....	64
Figure IV- 1: Essais d'équivalent de sable.....	69
Figure IV- 2: Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire.....	70
Figure IV-3: Matériels pour l'analyse granulométrique.....	73
Figure IV-4: Analyse granulométrique de sable de Boussaâda.....	74
Figure IV-5: Récipient de mesure en acier pour masse volumique (10L et 7L).....	77
Figure IV 6: Analyse granulométrique du gravier $3/8$ et $8/16$	81
Figure IV-7: Appareil de l'essai Los Angeles.....	81
Figure IV- 8: Ciment de M'sila (CPJ CEM II /B 42.5).....	83
Figure IV 9: Préparation des Alfa: immerge des tiges dans l'eau.....	88
Figure IV- 10: Traitement de fibre Alfa par 3% NAOH.....	88
Figure IV- 11:(a) Traitement d'Alfa par H_2SO_4 éliminé les trace de NaOH, (b) Fibre d'Alfa Traitées.....	89
Figure IV- 12: Etuve de séchage à $70^{\circ}C$	89
Figure IV-13: Alfa traité et non traité.....	90
Figure VI-1 : L'étalement en fonction de type de béton.....	106
Figure VI-2 : La boîte en « L » en fonction de type de béton.....	107
Figure VI-3 : Stabilité au tamis en fonction de type de béton.....	107
Figure VI-4 : La masse volumique en fonction de type de béton.....	109
Figure VI -5 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.1%).....	110
Figure VI -6 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.1%).....	110
Figure VI -7 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.15%).....	111
Figure VI -8 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.15%).....	112
Figure VI -9 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.1%).....	113
Figure VI -10 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.1%).....	113

Figure VI -11 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.15%).....	114
Figure VI -12 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.15%).....	115
Figure VI -13 : Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités longues.....	116
Figure VI -14 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités longues.....	117
Figure VI -15: Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités courtes.....	118
Figure VI -16: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités courtes.....	118
Figure VI -17 : Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités longues.....	119
Figure VI -18: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités longue.....	120
Figure VI -19: Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités courtes.....	121
Figure VI -20 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités courtes.....	121
Figure VI -21 : Influence de la nature de fibres longues sur la résistance à la compression du béton autoplaçant.....	122
Figure VI -22 : Influence de la nature de fibres longues sur la résistance à la traction par flexion du béton autoplaçant.....	123
Figure VI -23: Influence de la nature de fibres courtes sur la résistance à la compression du béton autoplaçant.....	124
Figure VI -24: Influence de la nature de fibres courtes sur la résistance à la traction par flexion du béton autoplaçant.....	124
Figure VI -25: Le Module de Young en fonction des BAP.....	126

Introduction générale :

Introduction :

Le BAP peut être considéré comme un matériau de haute performance, qui s'écoule sous l'effet de son poids propre sans recours à aucune vibration mécanique, pour s'adapter aux formes désirées, même dans le cas d'un espacement très faible entre les armatures.

Cette mise en place sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité des matériaux mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité.

Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par :

- Une qualité élevée de particules fines.
- Un rapport E/C faible et fixer le dosage de super-plastifiant.

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 ont été beaucoup étudiés depuis ces dernières années car les fibres végétales possèdent beaucoup d'avantage comparés aux fibres d'amiante: le faible coût, des propriétés d'élaboration plus saines 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.

En Algérie les fibres végétales (Alfa, le Diss...etc) aussi que le liège se trouvent abondants leurs récoltes et leurs industrialisations sont une source de revenus considérable pour des populations entières.

La fibre Alfa 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 ce travail consiste à apporter une contribution à la valorisation de ressource naturelle locale, qui est les fibres Alfa grâce à leur faible cout et leur disponibilité. Dans ce prétexte, nous avons pensé à l'utilisation des différents types des fibres Alfa, disponibles dans notre région Hodna, comme renforts du béton autoplaçant. Nous avons étudié particulièrement l'influence du traitement chimique de ces fibres sur le comportement rhéologique (l'étalement, la boîte en L, stabilité au tamis et la masse volumique) et mécanique (résistance à la compression, résistance flexion par traction) du béton autoplaçant.

Notre mémoire comporte six chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les bétons autoplaçant dans le cas général.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre est une étude bibliographique consacré au béton autoplaçant fibré et à son comportement à l'état frais ainsi bien à l'état durci, rôle des fibres, influence des fibres sur les propriétés à l'état frais.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la classification et les propriétés essentielles des fibres végétales utilisés comme renforts.
- Le quatrième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques (Ciment, filler calcaire, super-plastifiant, fibres, sable et gravier.)
- Le cinquième chapitre est consacré à l'étude expérimentale, la méthode utilisée (méthode dite " AFGC"), Composition de béton et l'étude de béton à l'état frais et durci.
- Le sixième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus avec des discussions.

Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus lors de cette étude.

Chapitre I :

Généralités sur le béton autoplaçant

Chapitre II :

Les bétons Fibrés

Chapitre III :

Généralités sur les fibres végétales

Chapitre IV :

Caractéristique des matériaux utilisés et composition du béton.

Chapitre V :

Techniques expérimentales

Chapitre VI :

Résultats et analyses

Conclusion générale :

Annexes :

I. Généralités sur le béton autoplaçant :

I.1 Introduction :

Le béton autoplaçant a été développé au Japon en 1988, il représente l'un des plus importantes avancées dans la technologie des bétons dans les deux dernières décennies.

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton capable, sous le seul effet de la pesanteur, de se mettre en place dans les coffrages même les plus complexes et très encombrés sans nécessiter pour autant des moyens de vibration afin de consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène. Ce type de béton doit être apte à passer à travers les armatures les plus serrées avec, cependant, une vitesse dépendante de la viscosité du mélange. Pour remplir cette condition, le béton doit être très fluide, c'est-à-dire très déformable. Or ceci n'est possible que si le rapport eau/ciment est élevé ou si le béton contient un super-plastifiant. [1]

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage. [1]

Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité peut être liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or, l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de chaleur d'une part, et d'autre part, le risque de nuire à la capacité de remplissage, propriété très recherchée pour ce genre de béton. [2]

Cette complexité amène à combiner différents paramètres pour obtenir le niveau désiré en termes de résistance à la compression. Mais avant d'atteindre cette étape, il est indispensable de s'assurer d'une part de la bonne capacité de remplissage de ces bétons, donc une déformabilité supérieure à celle des bétons ordinaires [1]. D'autre part, il faut s'assurer de la stabilité du mélange et éviter, par conséquent, la ségrégation [3]. Très souvent, la satisfaction de ces deux exigences entraîne un compromis. En clair, en plus de garantir un étalement compris entre 500 et 700 mm et d'assurer une très bonne capacité de remplissage, il faut que l'agent de viscosité introduit pour améliorer la viscosité n'abîme pas la déformabilité du béton. [4]

I.2 Historique :

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

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

C'est dans cet ordre d'idées que plusieurs compagnies, centres de recherche et universités dans le monde ont dirigé leur études vers le développement d'une nouvelle gamme de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures du point de vue théorique et architectural (structure qui se caractérisent par la complexité de leurs modèles, forme variable et courbures multiples et à ferraillements très congestionnés), face à une main d'œuvre de moins en moins qualifiée engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration de béton surtout au Japon. [5]

I.3 Définition :

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'association française de génie civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons (très fluides, homogènes et stables). [6]

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une 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 super plastifiants et de fines et/ou l'emploi d'agents de viscosité.

Un BAP doit être assez fluide pour pouvoir être mis en place avec un débit suffisant et remplir les coffrages sans apport de vibration sous l'effet de son propre poids tout en restant homogène. Cependant, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle (par exemple, une armature de ferraillement), les gravillons ont tendance à venir en contact pour former des voûtes solides qui bloquent l'écoulement. C'est ce que l'on appelle le risque de blocage. Ainsi, le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement y compris au droit des armatures. Un béton auto plaçant doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise et rester homogène afin de satisfaire aux propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi la difficulté du cahier des charges d'un BAP est la recherche d'un compromis satisfaisant entre une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation aussi bien au repos qu'en écoulement. [7]

I.4 Les avantages des bétons autoplaçants :

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

I.4.1 Avantages techniques :

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.

I.4.2 Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

I.4.3 Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).

I.5 Concept du 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 extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. [8]

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

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais [7] [9]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (**figure I-1**). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

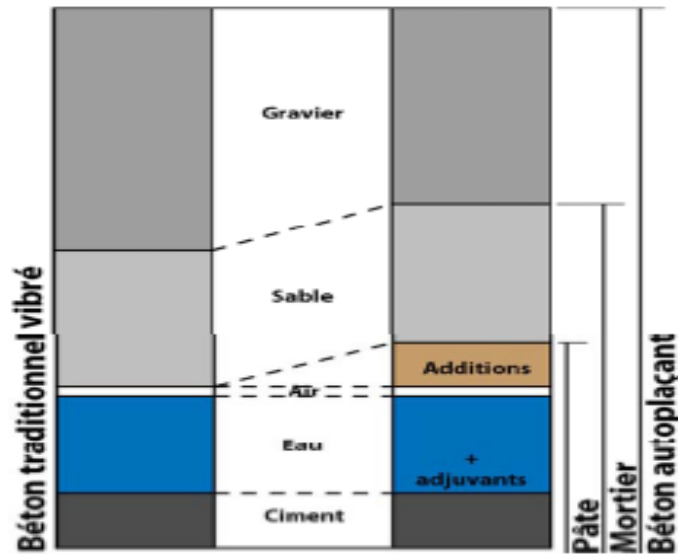


Figure I-1:formulation qualitative du BAP [10]

I.6 .Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais :

I.6.1 Rôle des adjuvants :

L'apparition des bétons autoplaçant et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des super plastifiants (SP). L'action principale des super plastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (**Figure I .2**). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [11].

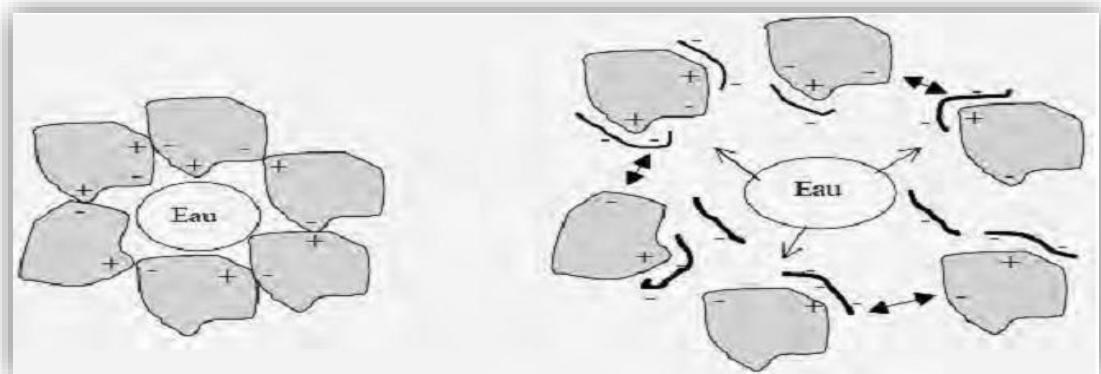


Figure I.2: Action du super-plastifiant Défloculation des grains de ciment [12]

L'ajout d'un super plastifiant aide à augmenter la fluidité. La (figure 1-5) montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en super plastifiant.[7]

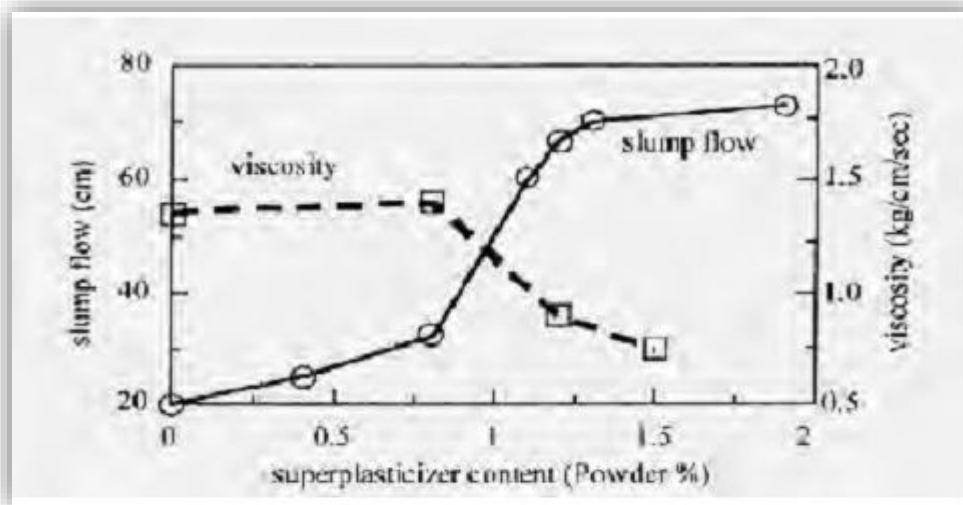


Figure I. 3: Influence de la qualité du super-plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [12]

Flatt et Houst [7] définissent l'action des super-plastifiants en trois mécanismes :

- Une partie est adsorbée.
- Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates.
- Une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs [7] montrent qu'une couche de gel ou de mono sulfo-aluminate (AFm) peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le super plastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante.

Squamate et al. [7] ont étudié l'influence de différents super plastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de super plastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les super plastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [7] ont montré que le moment d'introduction du super plastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible, i.e. il est obtenu pour une plus faible quantité de super plastifiants. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du super plastifiants par les hydrates sera moins importante [7]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au super plastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les BAP contiennent des super plastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [12]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un super plastifiant.

I.6.2 Volume de pâte élève :

Les formules de bétons auto nivelant actuellement réalisées au Japon et au Canada se caractérisent par un fort dosage en liant. En effet, ces bétons ont souvent des teneurs en liant supérieures à 500 Kg/m³ [5]. De plus les chercheurs japonais et canadiens ont montré l'intérêt et d'utiliser des fortes teneurs en additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice, additions calcaires, etc.) afin d'obtenir à la fois une grande fluidité et une bonne stabilité du béton.[7]

Les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les BAP contiennent un volume de pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l.m³, dont le rôle est d'écarter les granulats les uns des autres. Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % [7], et qu'un super plastifiant est employé pour fluidifier la pâte.

I.6.3. Volume de gravillons :

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. [7]

Tous ces paramètres de formulations conduisent à des compositions différentes des BV. Les BAP présentent à la fois une grande fluidité, l'utilisation de super plastifiants ainsi qu'un volume de pâte importante.

I.7. Les constituants d'un BAP :

I.7.1. Introduction :

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

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

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants [10].

I.7.2.Ciment et eau :

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

Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20%. [7]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, 3CaO.SiO₂, que l'on écrit C₃S ;
- Le silicate bicalcique, 2CaO.SiO₂, que l'on écrit C₂S ;
- L'aluminate tricalcique, 3CaO.Al₂O₃, que l'on écrit C₃A ;
- L'aluminoferrite tetracalcique, 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃, que l'on écrit C₄AF.

Suivant la carrière d'origine et les performances recherchées, le clinker est constitué de 62 % à 67 % de chaux combinée (CaO), de 19 % à 25 % de silice (SiO₂), de 2 % à 9 % d'alumine (Al₂O₃), et de 1% à 5 % d'oxyde de fer (Fe₂O₃).

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs. [7]

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton auto plaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un

constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts. [7]

Les différents types de ciment :

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principale. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) : [10]

- ❖ CEM I: Ciment Portland (CPA).
- ❖ CEM II : Ciment Portland composé (CPJ).
- ❖ CEM III : Ciment de haut-fourneau (CHF).
- ❖ CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- ❖ CEM V : Ciment composé (CLC).

Eau :

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

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

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. [10]

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [13] :

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

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

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

I.7. 3.Granulats :

On appelle granulats un ensemble des grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- Des mortiers, des bétons.
- Des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées.
- Des assises et des ballasts de voies ferrées.

Ils sont appelés fillers 1, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions.[14]

Les fillers	0/D	Avec $D < 2\text{mm}$ et au moins 70% de passant à 0.063mm
Les sablons	0/D	Avec $D \leq 1\text{mm}$, et moins de 70% de passant à 0.063mm
Les sables	0/D	Avec $1 < D \leq 6.3\text{mm}$
Les gravons	0/D	Avec $D > 6.3\text{mm}$
Les gravillons	d/D	Avec $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$
Les ballasts	d/D	Avec $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$

Tableau I-1: Classes granulaires.

Les granulats sont le constituant de base de tous travaux de génie civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences), tant de point de vue de leurs élaborations, qui de leur utilisations (mise en œuvre), et ce, afin de maîtriser au mieux le coût tout en respectant de critères de qualité.

La nature les gisements conditionne les propriétés intrinsèques (résistance, porosité, etc...) des granulats. Par contre, les caractéristiques géométriques (granularité, forme, etc...) et de propreté sont fonction du processus d'élaboration.

Pour fabriquer des produits ayant les qualités requises, les producteurs de granulats utilisent des installations de plus en plus complexes, faisant appel à des technologies bien maîtrisées (fragmentation, séparation gravitaire, lavage, etc...).

En fonction des systèmes de contrôles mis en place par les producteurs, les granulats peuvent désormais même faire l'objet d'une certification (marque NF-Granulats) basé sur la norme XP P 18-545 (février 2004) au même titre que n'importe quel produit manufacturé[14].

I.7.3.1 Classification – Normalisation :

D'après leur provenance ou leur fabrication: **On distingue**

Granulats naturels :

Origines		
Roches sédimentaires	Roches métamorphiques	Roches éruptives
Siliceuses ou calcaires	Quartzes, marbres	Granites, basalte porphyres

I-2: Granulats naturels

Utilisés directement sans aucun traitement mécanique

Granulats naturels d'origines industrielles:

Provenant de concassage des roches dures, en général quartzieuses: granit, quartzite, porphyre, basalte, calcaire monolithique dur, sont caractérisés par un point commun: aspect anguleux, arêtes vives.

- **D'après leur dimension :** 5 catégories de granulats.
- **D'après leur nature minéralogique :** Siliceux, calcaire, granitiques, (argileux ou siliceuses).

I.7.3.2 Type de granulats utilisés :

Ils sont le plus souvent siliceux, calcaire ou silico-calcaires.

➤ **Granulat roulés :**

Ce sont des granulats alluvionnaires dont la forme arrondie provient des phénomènes d'érosion. Ces granulats lavés pour éliminer les particules argileuses puis criblés pour obtenir leur classement par démentions de grains compris entre les dimensions d et D.

➤ **Granulats concassés :**

Ils sont obtenus en carrière après abattage des blocs et concassage suivi de criblage sur différents tamis [14].

I.7.4 Les adjuvants :

Il y a déjà longtemps qu'a été remarquée et étudiée l'action sur les bétons de ciment de certains produits employés en faibles quantités. Depuis une dizaine d'années leur usage s'est généralisé et on peut admettre maintenant que plus de 50% des bétons sont adjuvants.

Au fur et à mesure du développement de leur emploi, la formulation des adjuvants est devenue de plus en plus élaborée et fait appel depuis ces dernières années à des produits de synthèse.

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporés dans le béton lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ».

La norme européenne **EN 934 -2** (dont la publication est prévue en 1995) a retenu la classification suivante :

- Plastifiants réducteurs d'eau.
- Super-plastifiants hautement réducteurs d'eau.
- Rétenteurs d'eau.
- Entraîneurs d'air.
- Accélérateurs de prise.
- Accélérateurs de durcissement.
- Retardateurs de prise.

I.7.4.1 Les super-plastifiant :

Les super-plastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de super plastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. [14]

Les super-plastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées. [14]

I.7.4.2 Les utilisations des super-plastifiants :

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

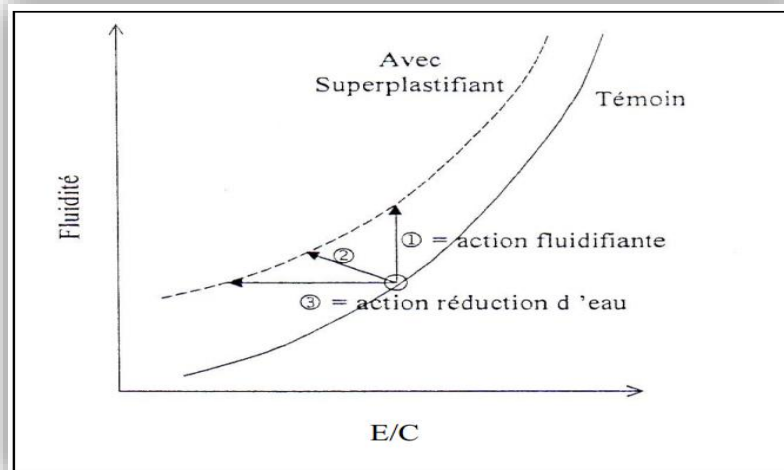


Figure I-4: Action des super-plastifiants [14]

I.7.4.3 Différent types de super-plastifiant :

A l'heure actuelle, on utilise essentiellement **05** principales familles de super-plastifiants :

- les super-plastifiants à base de naphthalène.
- Les super-plastifiants à base de mélamine.
- Les lignosulfonates.
- Les polyacrylates.
- Les produits à base d'acides poly carboxyliques.

I.7.5 Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 ,
- Une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie laser.

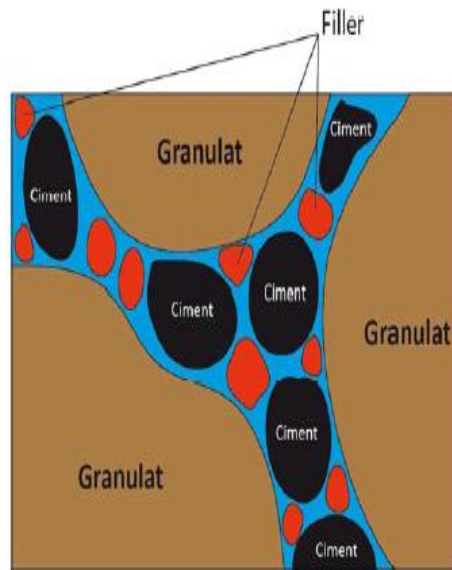


Figure I-5: Illustration de l'effet filler [12]

I.7.5.1. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP :

A formulé deux bétons autoplaçant avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de $3 \mu\text{m}$ et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes. [12]

Ogawa et al. (1995) (rapporté par ont développé des formulations de bétons fluides (Détalé = $650 \pm 30 \text{ mm}$) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports $E/C = 0,55 \pm 5\%$, contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 L , des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm , un rapport volumique de Sable/Granulats de $51 \pm 1\%$, 8 kg/m^3 de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m^3 d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage. [12]

I.8 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais :

Les bétons autoplaçants sont utilisés, puisqu'ils sont mis en place sans vibration, pour leur aptitude à remplir les coffrages les plus densément armés sans intervention extérieure. Cette caractéristique est communément appelée « capacité de remplissage ».

La capacité de remplissage dépend de deux facteurs : La déformabilité et la résistance à la ségrégation.

OZAWA et al [15] ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton. Pour des valeurs d'affaissements plus élevées au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : c'est la ségrégation.

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La (figure I-6) montre la relation entre les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

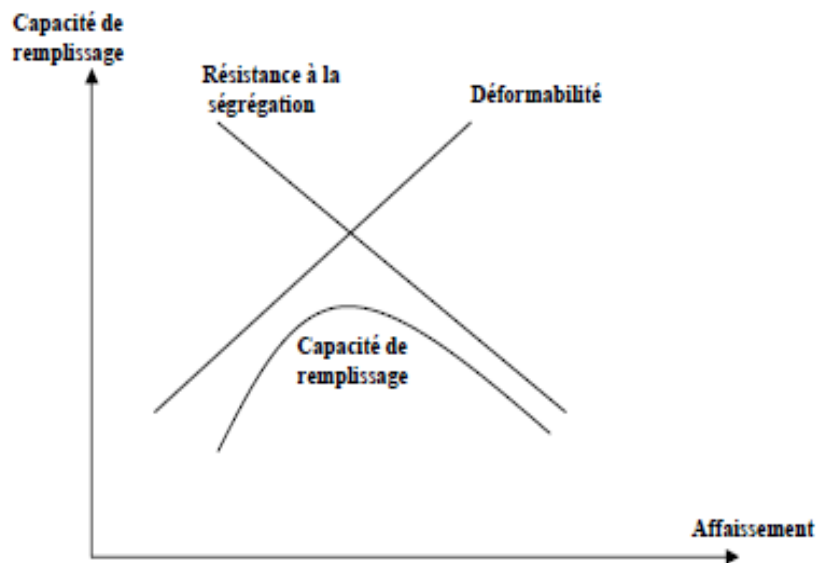


Figure I- 6:Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires : fluidité et résistance à la ségrégation .Pour résumer, on présente les propriétés des BAP, les moyens de les obtenir et les actions entreprises pour leur mise en œuvre dans le (tableau I-3) :

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pate
	Optimisation de la pate	Utilisation des Super-plastifiants
		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
	Réduction de la séparation de phases	Réduction du rapport E/C
		Utilisation d'agents de viscosité
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des granulats	Réduction du volume de gravier
		Réduction de la taille maximale des granulats

Tableau I-3: Propriétés d'ouvrabilité des BAP [15]

I.8.1 Essais à l'état frais :

Les essais de caractérisation à l'état frais vont être présents en accord avec la propriété qu'ils permettent de caractériser. Ensuite la séquence de réalisation de ces essais sera présentée.

I.8.1.1 Capacité de remplissage :

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externe ou interne)[14].

La capacité de remplissage est à la fois caractérisée par un degré de remplissage (étalement, Seuil) et par une vitesse de remplissage (t50, temps au V-funnel et viscosité).

I.8.1.2 Etalement [NF EN 12350-8] :

Le premier essai, aussi le plus simple et le plus largement pratiqué, consiste à mesurer l'étalement au cône d'Abrams.

On place en une seule fois un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (**Figure I-7**). Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton.

Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il nous renseigne sur la déformabilité du béton. [14]

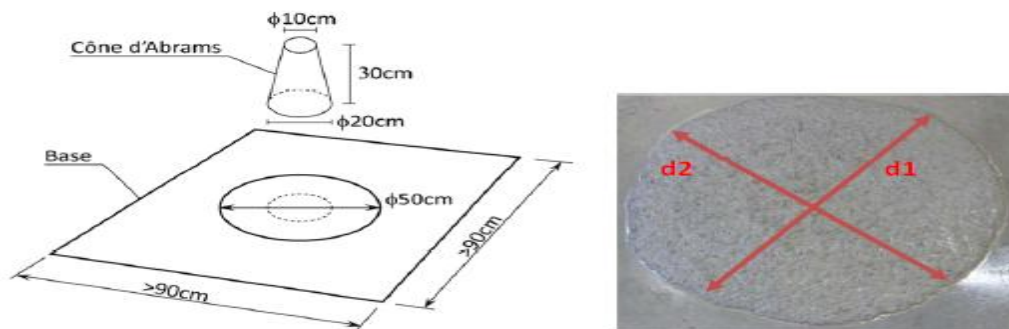


Figure I-7: Essai d'étalement [14]

La norme NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes (**Tableau I-4**).

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

Tableau I-4: classes d'étalement

Cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50cm, et qui nous renseigne sur la vitesse de mobilité du béton. Deux classes sont définies (**Tableau I-5**). [14]

Classe	T ₅₀ en s
VS1	< 2,0
VS2	≥ 2,0

Tableau I-5: classes de la viscosité apparente - t50

I.8.1.3 V-Funnel [NF EN 12350-9] :

L'essai d'écoulement au V-funnel (**Figure I-8**) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Des classes de viscosité des BAP sont définies (**Tableau I-6**)[14].

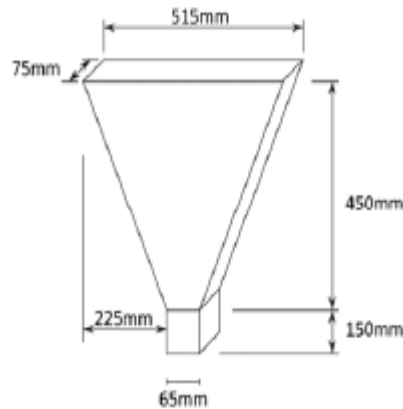


Figure I-8: L'essai d'écoulement au V-Funnel [14]

Classe	Temps en s
SF1	< 9,0
SF2	9,0 à 25,0

Tableau I-6: Classes de viscosité apparente -V –funnel [14]

I.8.1.4 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 armatures ou dans un confinement [14]. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la (**figure I-9**) ci-dessous qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

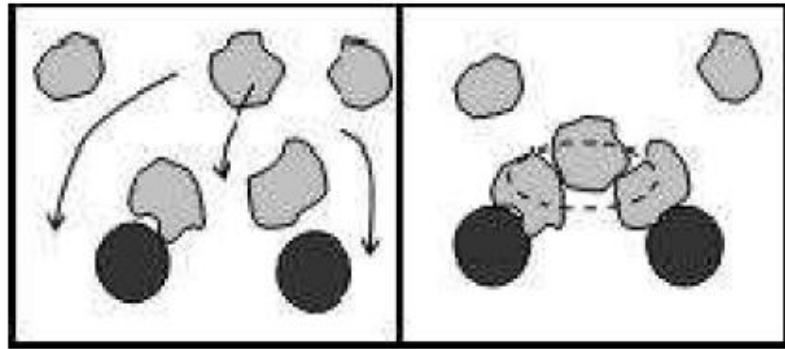


Figure I-9: Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures

Deux essais permettent de qualifier la capacité de passage du béton.

I.8.1.5 Essai à l'anneau [NF EN 12350-12] :

L'essai d'étalement à l'anneau (J-ring) est un essai d'étalement au cône d'Abrams ou l'écoulement du béton est perturbé par une série d'armatures placées autour du cône (**Figure I-10**). Le résultat de cet essai est exprimé par la différence entre la mesure du diamètre d'étalements obtenu sans et avec l'anneau. S'il existe deux types d'anneaux avec plus ou moins d'aciers suivant la classe, l'écart maximal entre les deux étalements est toujours fixe à 10 cm (**Tableau I-7**). [10]

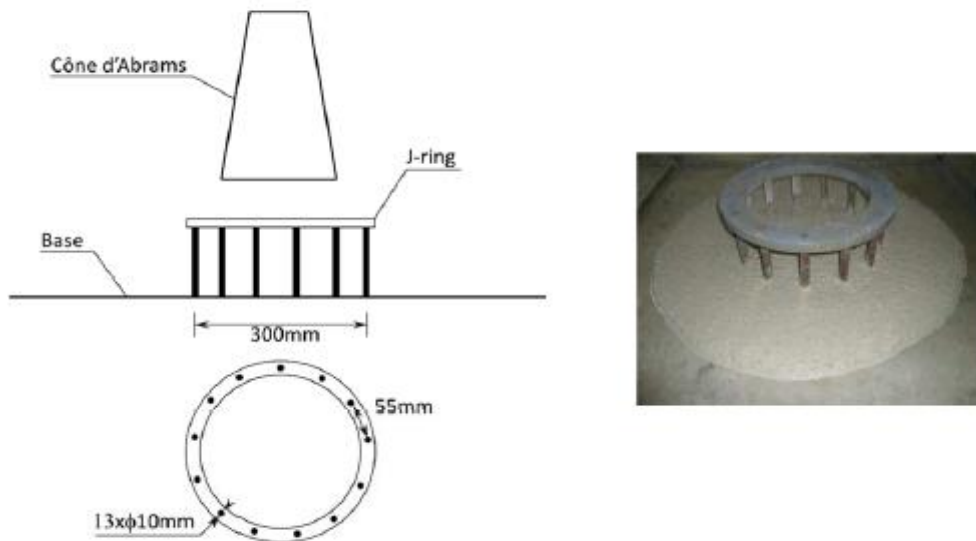


Figure I-10: Essai d'étalement à l'anneau (J-ring) [10]

Classe	Palier d'étalement à l'anneau en mm
PJ1	≤ 100 avec 12 armatures
PJ2	≤ 100 avec 16 armatures

Tableau I-7: Classes d'aptitude à l'étalement à l'anneau [10]

Remarque :

L'anneau utilisé par la norme EN 206-9 est de diamètre 300 mm et est composé par des armatures diamètre 10 mm. L'anneau que nous avons utilisé reprend ces dimensions mais avec 13 aciers, ce qui donne un espacement entre les aciers de 55 mm.

I.8.1.6 Boîte en L [NF EN 12350-10] :

Dans cet essai, un échantillon de béton est coulé en une seule fois dans la partie verticale de la boîte. On ouvre ensuite la trappe située en partie inférieure et on observe l'écoulement à travers une série d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte. Le résultat est représenté par le ratio $H2/H1$ (**Figure I-11**). De la même manière que pour l'essai à l'anneau, il existe deux classes en fonction du nombre d'armature (2 ou 3) avec un ratio minimal fixe à 0,80 (**Tableau I-8**). [10]

L'ensemble des essais a été réalisé dans les conditions de la classe PL2 (3 aciers).

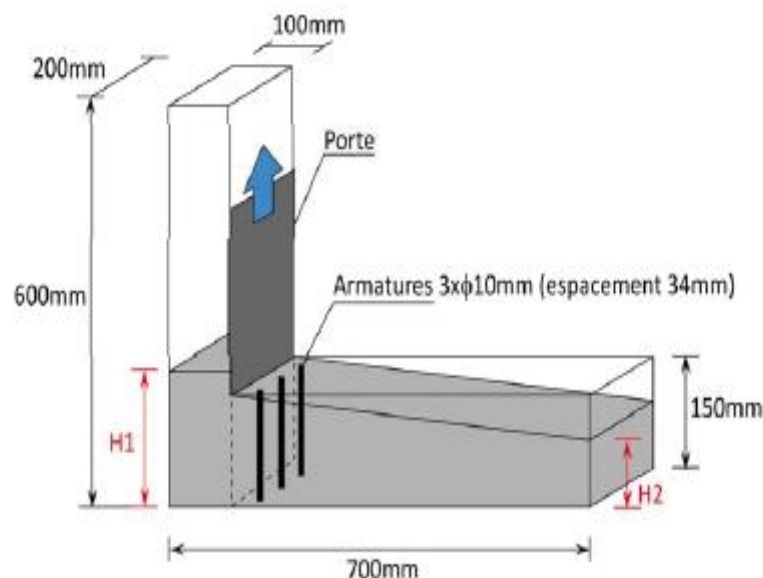


Figure I-11: Essai à la boîte en L [10]

Classe	Taux de remplissage H2/H1
PL1	≥ 0,80 avec 2 armatures
PL2	≥ 0,80 avec 3 armatures

Tableau I-8: Classe l'aptitude à l'écoulement

I.8.1.7 Essai de stabilité au tamis :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**Figure I-12**). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier. [11]

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes: [6]

- $0\% \leq \% P_{\text{laitance}} \leq 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < \% P_{\text{laitance}} \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ.
- $\% P_{\text{laitance}} > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure I-12: Essai de stabilité au tamis

Observation de la ségrégation :

Lors de l'essai d'étalement, deux indicateurs visuels peuvent alerter sur l'homogénéité du béton. Soit l'apparition d'un dôme de granulats au centre de la galette qui indique que la pâte n'a pas les propriétés suffisantes pour entraîner les plus gros grains. Soit, l'apparition de laitance en périphérie de la galette qui montre une séparation des phases du béton (**Figure I-13**).



Figure I-13: Laitance en périphérie de la galette d'étalement

I.8.1.8 Essai de ressuage :

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.[12]

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.[12]

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC (**Figure I-14**). Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [10]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

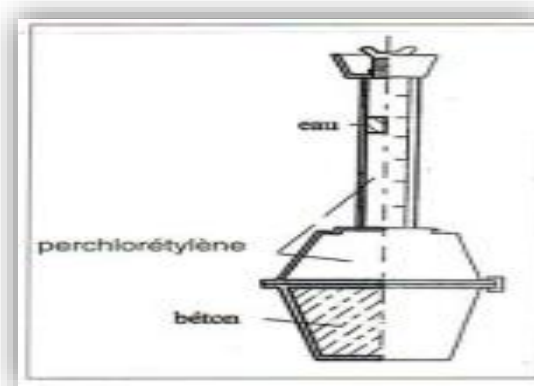


Figure I-14: Essai de ressuage

I.9 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état durci :

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais de compression.
- Les essais de traction par flexion.

I.9.1 Les essais de compression :

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm conformément aux prescriptions de la norme.

Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (**Figure I-15**). La contrainte de compression à la rupture [Pa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.[7]



Figure I-15: Mesure de la résistance à la compression

I.9.2 Les essais de traction par flexion :

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (**Figure I-16**). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions 7x7x28 cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = M_f.a/2I$, avec le moment de flexion : $M_f = F.L/4$, où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme.[7]



Figure I- 16: Mesure de la résistance à la traction par flexion

I.9.3 Module d'élasticité :

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

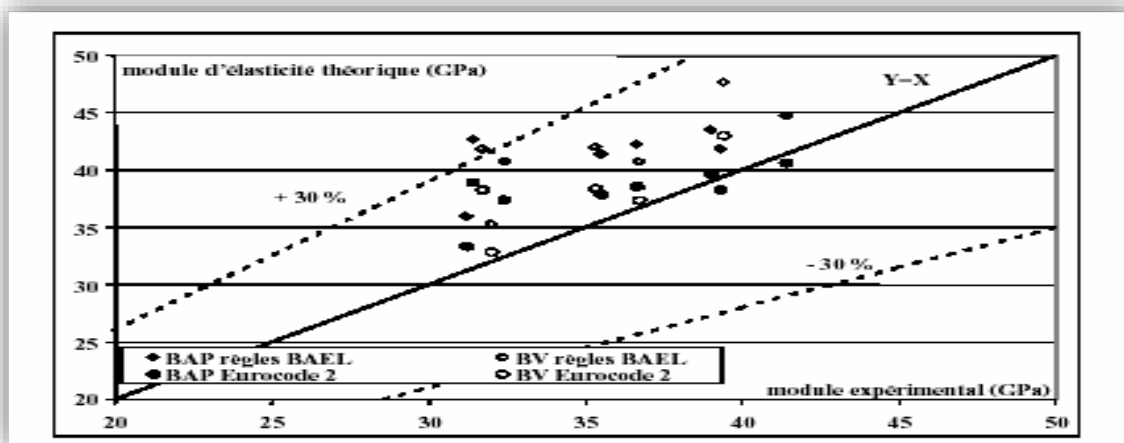


Figure I-17: Comparaison des modules élastiques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [7].

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [3], les mêmes résultats trouvés. Par contre, le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide.

[Jacob et Hunkeler 99] ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

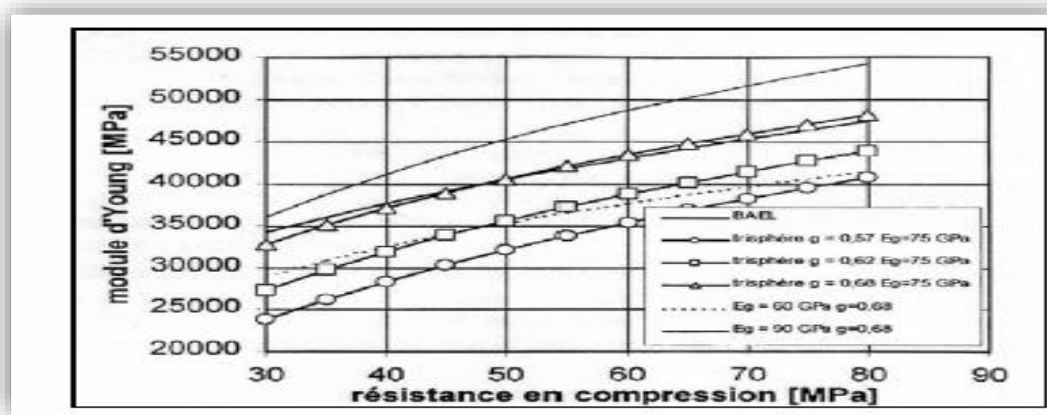


Figure I -1: Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [7].

I.10 Méthodes de formulations des BAP :

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

La première [Hayakawa 95, Nagataki 95] 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) et l'utilisation d'adjuvants tels que les super-plastifiants et les agents de viscosité permettent d'en 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. [16]

Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. [7]

I.10.1. Différentes types des méthodes :

A)- Méthode japonaise: [7]

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

1. Dosage des gravillons: Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

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

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

4. Dosage de l'eau et du super plastifiant : Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

B)- Méthode Suédoise: proposée par [Petersson et al, 1996]:

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al, 1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées. Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la

compression visée. Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat. [16]

C)- Méthode Française :

Méthode française (LCPC) : proposée par [De Larrard et al, 1994] : Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple).
- le dosage, à saturation, du super plastifiant 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 super plastifiant) 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 super-plastifiant 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. [16]

I.11 Domaine d'utilisation des BAP :

les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [16] la plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.)

les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- _ Densités de ferrailage importantes.
- _ formes et géométries complexes : voiles, courbes,..... .
- _ voiles minces et de grande hauteur : piles de pont,..... .
- _ voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- _ Exigences architecturales et qualité de parement particulière.

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

Le pont Akashi Kaikyo (**Figure I-19**), le plus long pont suspendu au monde (3910 m) ou 390000 m³ de béton autoplaçant ont été versés dans les coffrages des fondations et des piliers très congestionnés sans vibration (OKAMIRA et coll.1994)



Figure I-19: Le pont Akashi Kkaikyo

La tour Landmark Tower (**Figure I-20**), ou un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (Hayakawa et coll .1995).



Figure I-20: La tour Landmark Tower

I.12 Fabrication, transport des BAP :

I.12.1 Fabrication des BAP:

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP .Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur. [9]

I.12.2 Transports des BAP :

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres :

Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température. Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton .En revanche tout ajout d'eau est à proscrire. [12]

I.13. Conclusion :

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- capacité de passage dans les milieux confinés.
- excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

A l'état durci le béton doit garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour celui-ci.

L'étape de formulation consiste une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

Le facteur le plus important dans la formulation d'un BAP est l'eau. En effet, le principe de ce type de béton est de diminuer la quantité d'eau utilisée tout en assurant une bonne maniabilité à l'état frais. La diminution de la teneur en eau conduit à de bonnes caractéristiques mécaniques.

Toutes les méthodes trouvées dans la littérature demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.

II. Bétons de Fibre :

II .1 Introduction :

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

Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures. Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BFM), en tant que matériau dans les applications industrielles, a vu le jour aux Etats-Unis au début des années 60 suite aux travaux de conduisant au dépôt d'un brevet. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un super plastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent. [17]

II.2 Définition de béton de fibres :

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées (**Figure II-1**), dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres sont capable de l'arrêt et coudre les fissures (**Figure II-2**) Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post-fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée la distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice. Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulats filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectant très fortement le comportement global du matériau durci. [18]

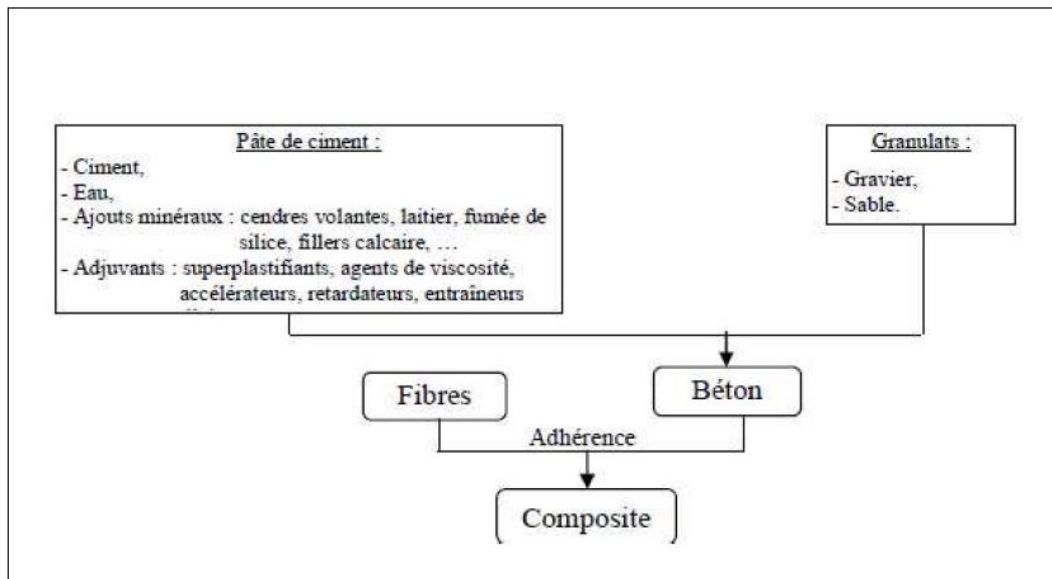


Figure II-1:Modèle de composite à base des fibres [18].

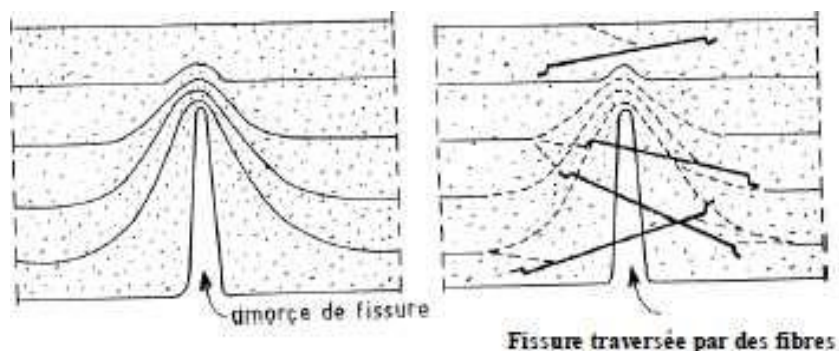


Figure II-2: Rôle des fibres dans la matrice de béton [18].

II.3 Les fibres:

II.3.1 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.

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions ". [19]

II. 3.2 Différents types de fibres :

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

II.3.2.1 Fibres naturelles :

➤ **Fibres minérales :**

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

➤ **Fibres végétales :**

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

II.3.2.2 Fibres synthétiques :

Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, polyester ... etc).

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

II.3.2.3 Fibres artificielles :

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

II.3.2.4 Fibres de polypropylène :

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille de polyoléfines. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine ou il apporte les avantages suivants: bonne résistance à la traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée.

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

➤ **Fibres de verre :**

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 tours d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100mm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12 et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types: les fibres de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes:

- Bonne adhérence avec la matrice.
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues.....).
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- Conductivité thermique relativement faible.

➤ **Fibres métalliques :**

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

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe

des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celle commercialisées par la société Bekaert sous la marque "DRAMIX".

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

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : Dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres. [17]

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

Fibres	Diamètre (Um)	Long mm	densité	R _t MPA	E 10 ³ MPA	Allongement a la rupture %	Cof de dilatation (u/m)	R _{feu} temps Max°C
Acier	5-500	20-80	7.8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte	36*2600 de section	50-60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5-20	40-70	2.6	1500-3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10-200	25-75	0.9	400-750	5-10	15-25	9	150
Polyester	-	-	1.4	700-850	8	11-13		
Amiante	0.02-20	5	2.5-3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5-9	variable	1.7-2	2000-3000	250-400	0.5-1.5	-	400-1500
Sisal	10-50	1.50	1.5		130	3	-	-

Tableau II 0-1: Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées [20]

II.3.3 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.

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

- La qualité a conférée à la matrice cimentaire.
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats ».

- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.
- Conservation de leurs propriétés dans le temps.

Les fibres 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). [21]

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

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

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

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

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. [18]

Leur géométrie est très variable (**Figure II- 3**). 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 [24] 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 entraînant 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.

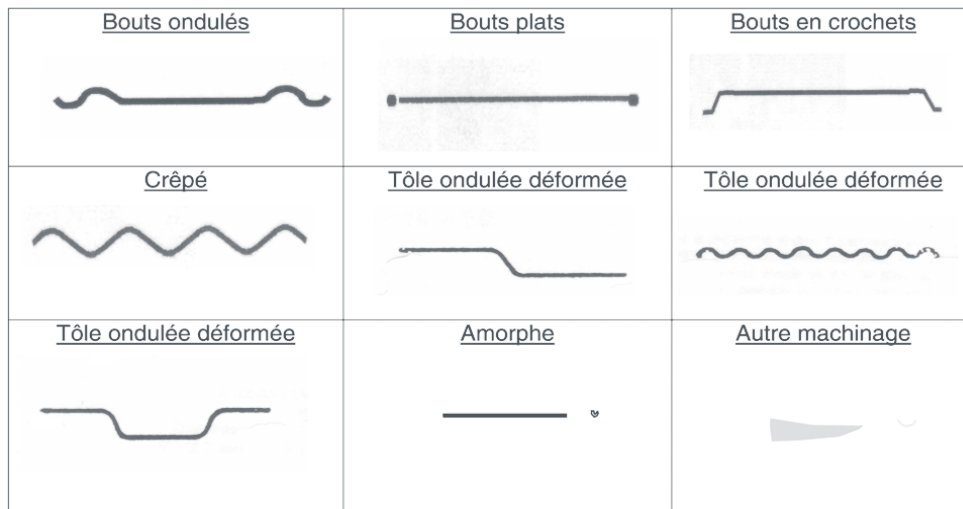


Figure II- 3: Différentes formes géométriques de fibres métalliques [25].

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [25]. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

II.3.4. Rôle des fibres :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

-Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la (**Figure II-4-a**).

-La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (**Figure II-4-b**). [17]

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

- ❖ L'amélioration de la cohésion du béton frais ; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire,
- ❖ l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration,
- ❖ la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge,
- ❖ la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur),

- ❖ l'augmentation de la résistance à la traction par flexion,
- ❖ l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion. [17]

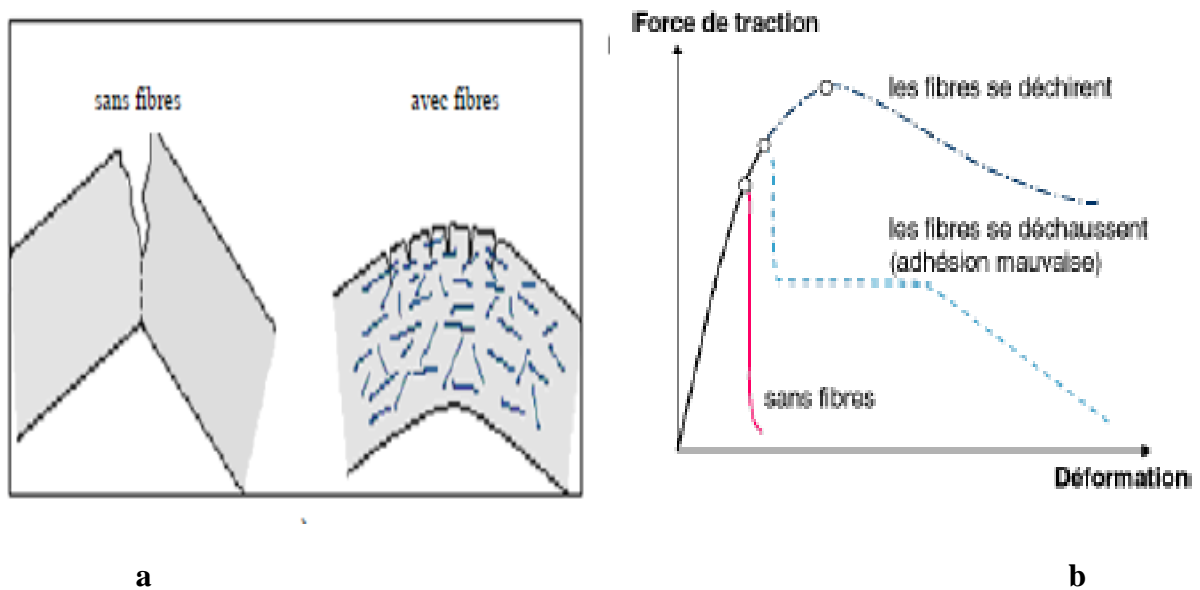


Figure II-4: Illustration de l'apport du renfort par des fibres [17]

Le principe de couturassions des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (Figure II-5). Les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration). Ces fibres se déforiment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration.[22]

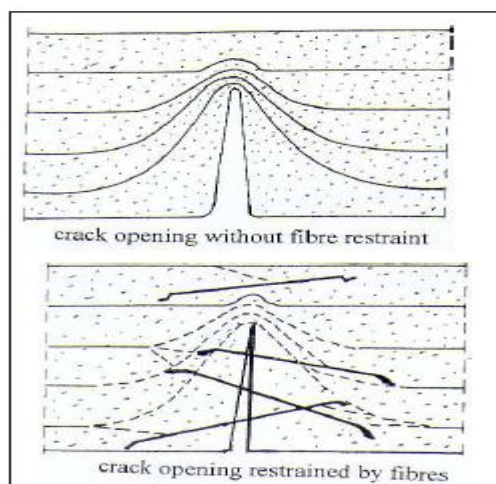


Figure II-5: Principe de couturassions d'une fissure [22]

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [Gopalaratnam et Shah 1987]. La (Figure II-6) illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres. [17]

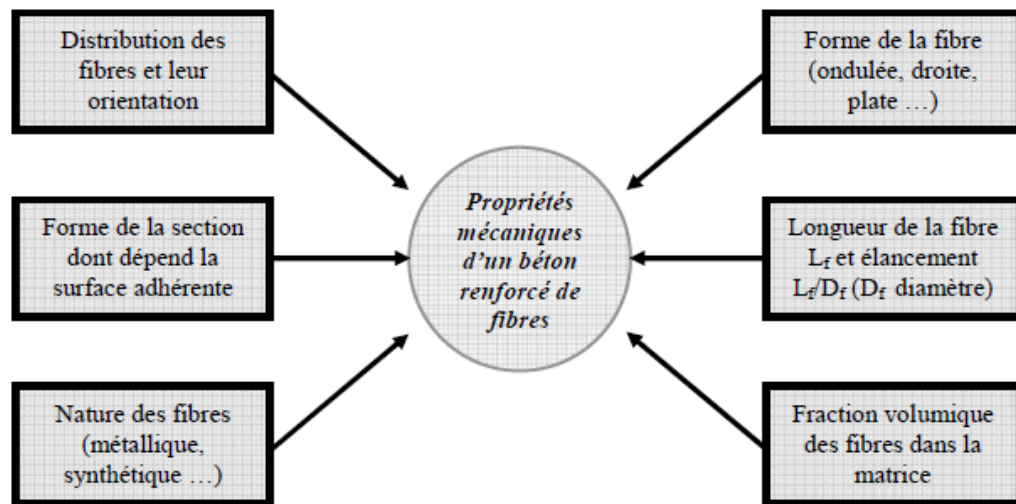


Figure II-6: Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibre [17]

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

II.3.5.Principe d'action des fibres :

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

Le matériau et la structure. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction. On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (**Figure II-7**). Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (auréoles de transition). La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives. La deuxième phase correspond au développement des microfissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une microfissure (phase 3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette. [17]

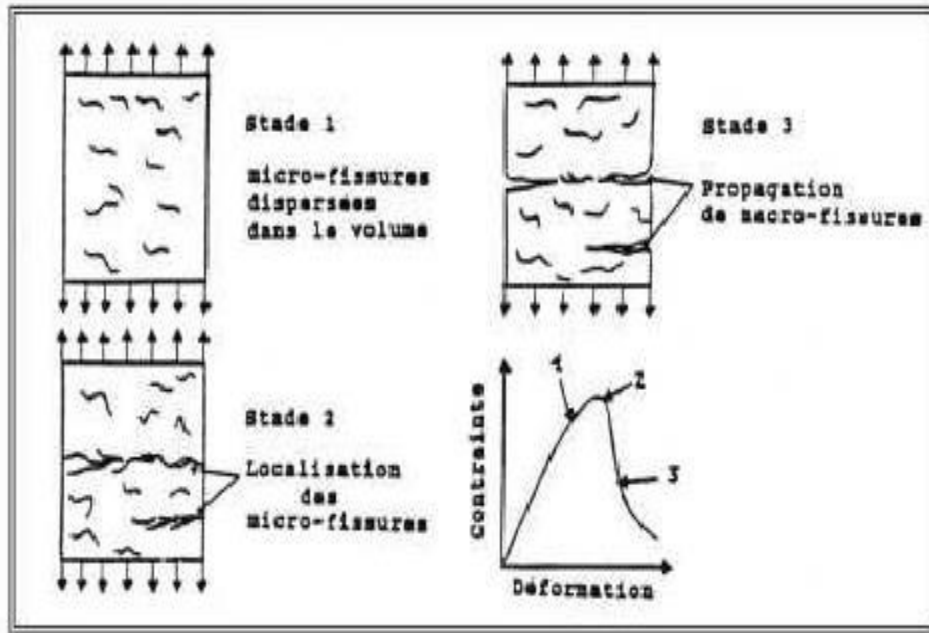


Figure II- 7: Processus de fissuration du béton [17]

La (Figure II-8) illustre le principe de couture des fibres à travers une fissure dans la matrice.

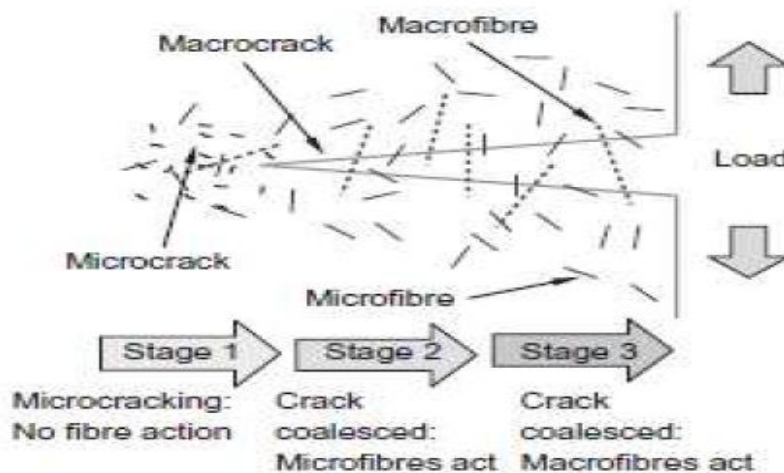


Figure II-8: Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite [17]

Seules des fibres fines (pour agir sur les microfissures et assurer leur ancrage) en grande quantité (pour couvrir l'ensemble du volume) peuvent donc apporter une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau en retardant le passage à la phase 2. En revanche, en phase 3, le pontage des macrofissures ne peut intervenir que par des fibres longues jouant un rôle similaire aux armatures dans le béton armé, même si le mécanisme d'ancrage est différent. Ce fonctionnement est résumé sur la (Figure II-9). [23]

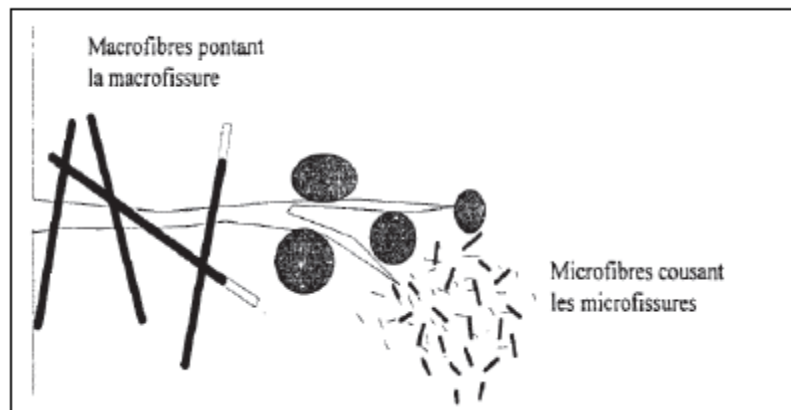


Figure II-9: Role des fibres dans le contrôle de fissuration du béton [21]

II.3.6 Durabilité des bétons de fibres :

Quand on parle de durabilité des bétons de fibres, il faut se placer à deux niveaux - deux échelles : celui du matériau et celui de la structure.

a) Le premier aspect à évoquer concerne bien sûr le problème de la corrosion des fibres (échelle matériau). Pour ce qui concerne les fibres synthétiques, à l'exception de certaines fibres d'aramide, il n'y a pas de problème de durabilité de la fibre dans le béton. Pour ce qui concerne les fibres métalliques, la corrosion des fibres peut bien évidemment survenir.

Le retour d'expérience et la recherche concluent sur deux points :

- la corrosion superficielle des fibres peut provoquer des salissures à la surface des structures exposées.
- la corrosion superficielle des fibres ne génère aucune pathologie, ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures les utilisant.

Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- optimisant la formulation du béton fibré ;
- utilisant des coffrages non métalliques ou munis d'une "peau interne" (tissu synthétique, par exemple).
- utilisant des fibres galvanisées.

b) Le second aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés concerne la tenue au feu des structures. Les fibres métalliques n'apportent pas un plus déterminant dans la tenue au feu des structures. Ce que l'on peut simplement souligner est qu'une structure en béton de fibres métalliques se comporte plutôt mieux vis-à-vis du feu qu'une structure en béton armé classique (moins d'éclatements).

Au contraire, certaines fibres synthétiques, notamment les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique.

Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu (évaporation de l'eau présente dans le béton). [23]



Figure II-10: Exemple de fibres macro-synthétiques utilisées en protection contre les incendies [23]

c) Pour ce qui concerne la durabilité des structures en béton fibré, un dernier point important concerne le maintien dans le temps d'une fonction demandée à une structure donnée. A l'exemple d'un revêtement quelconque en béton fibré à qui on demande d'assurer une fonction d'étanchéité (vis-à-vis des infiltrations d'eau, par exemple). Du fait du fluage des fibres synthétiques, évoqué précédemment, cette fonction, un moment assurée par une structure en béton de fibres synthétiques, peut ne plus l'être quelque temps plus tard. Il s'agit d'un problème pour lequel les bétons de fibres métalliques ne sont pas concernés.

Enfin, dans le cas d'éléments préfabriqués manu portables, ou dans celui des structures susceptibles d'être en contact direct avec les usagers, des problèmes de sécurité peuvent se poser, s'agissant de bétons de fibres métalliques. Ce phénomène concerne surtout les bétons de fibres dont les fibres sont de petits diamètres, c'est-à-dire inférieures ou égales à 0,25 mm.

En effet, on ne peut jamais garantir à 100 % qu'aucune fibre métallique n'affleurerà à la surface de la structure, ce qui peut occasionner des blessures.

Des solutions techniques existent pour pallier cet inconvénient, solutions dont il ne faut pas faire l'impasse.

Ces problèmes de blessure occasionnés par des fibres n'existent pas avec les fibres synthétiques [23].

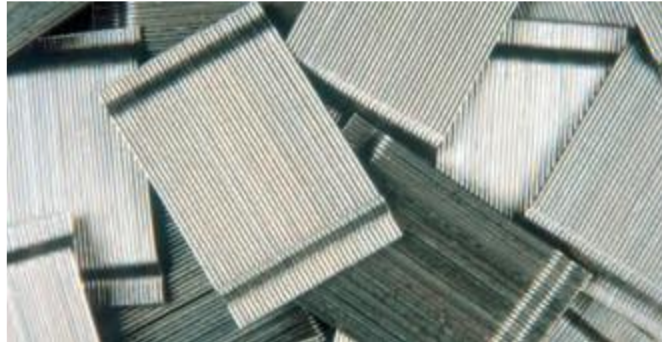


Figure II-11: Exemple de fibres métalliques [23]

II.3.7 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres :

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

Le choix du type de fibres utilisées est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. S'agissant de la nature, la fibre métallique est la plus utilisée. Dans le cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité [Markovic et Walraven 2003], [Pons et al 2007] (Figure II-12 a et b). [17]

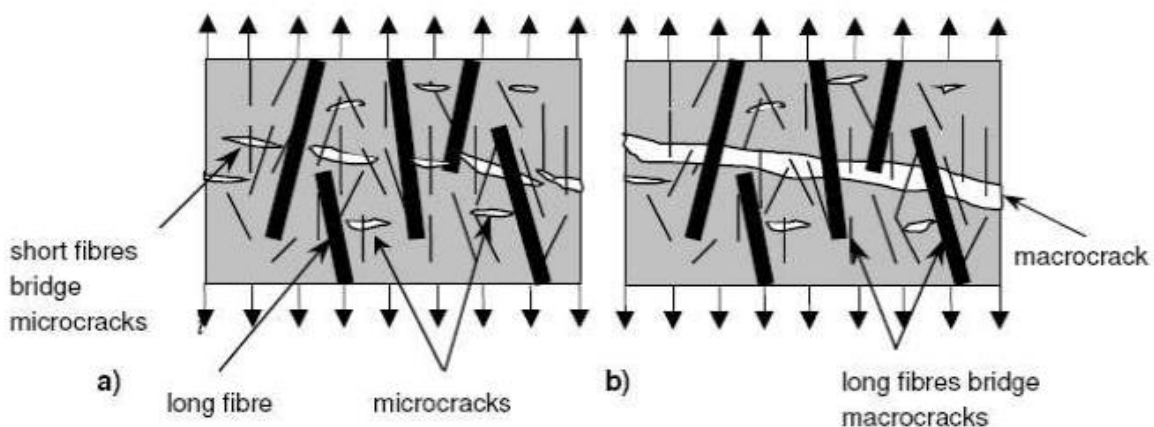


Figure II-12: Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macro fissures [17]

II.3.8 Les avantages du béton de fibres :

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

a) Aspect technique :

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

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

b) Aspect économique :

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction.
- Une optimisation du dimensionnement.

II.4 Bétons autoplaçants fibrés :

II.4.1 Définition :

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

➤ Particularités :

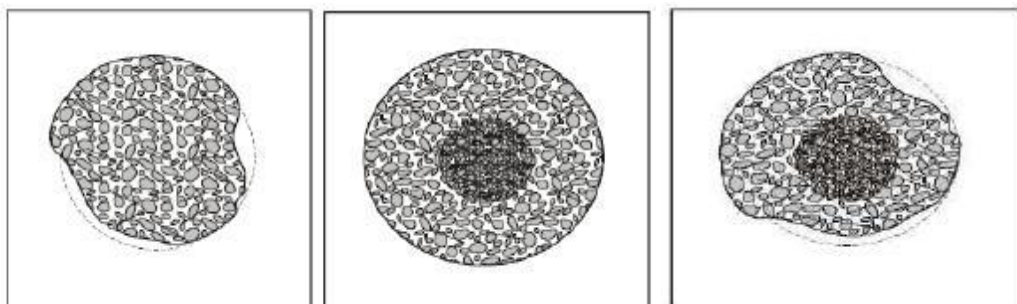
Les bétons autoplaçants fibrés doivent avoir les mêmes propriétés de base que les BAP non fibrés : étalement maximal, non ségrégation, non ressuage, non blocage etc, et ce malgré l'addition de particules supplémentaires que sont les fines.

II.4.2 Influence des fibres sur les propriétés à l'état frais :

Une étude réalisée par Grünewald a réalisé un programme 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 sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, les conclusions ci-après ont été tirées. [17]

II.4.2.1.Effet sur l'étalement :

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence. On remarque aussi sur la (**Figure II-13 –a**) une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions (**Figure II-13 -b**) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La (**Figure II-13 –c**) illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu (ex : D_{ramix} 65/40 BN). [17]



a) b) c)

Figure II-13: Effets des fibres sur l'étalement des BAP

II.4.2.2 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. Peters son 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 [17] 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.

II.4.3 Comportement mécanique des bétons autoplaçant fibrés :

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration. Dans cette partie, nous nous limiterons au comportement instantané. Le retrait et le fluage peuvent être, considérés comme similaires à ceux des compositions ordinaires, même si cela reste à confirmer compte tenu du peu de recherches menées sur ce sujet. [17]

II.4.3.1. Comportement à la flexion :

Une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

Les études effectuées sur le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres (métalliques de type Fibrilleux (FM) 30x1,6 x 0,03 mm et synthétiques de type polypropylène (FS) 50x1,6x0,4 mm). 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 (compositions qui seront plus tard utilisées dans nos essais). 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 II-14) illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en terme de courbe force-flèche. [17]

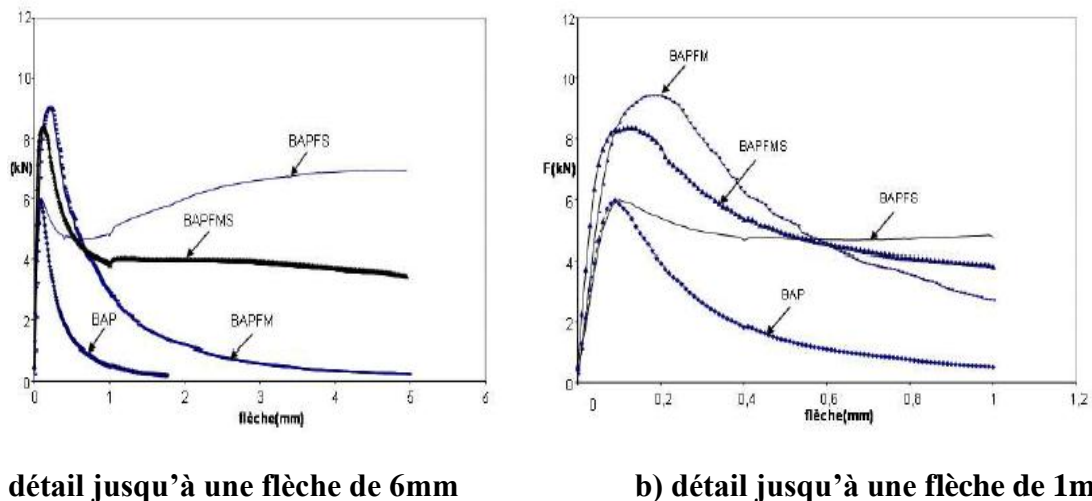


Figure II-14: Courbe effort-flèche pour différentes compositions [17]

Une étude réalisée par Kawamata et al ont montré que l'augmentation de la longueur et du volume des fibres métalliques améliorerait le comportement à la flexion des bétons. Dans cette étude, les conclusions doivent être entendues dans ces limites, l'auteur ayant utilisé des fibres métalliques de longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un dosage volumique maximal en fibres de 1%. [17]

II.4.3.2. Comportement à la compression et à la traction :

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L.

Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports 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. 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 macro fissures 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. [17]

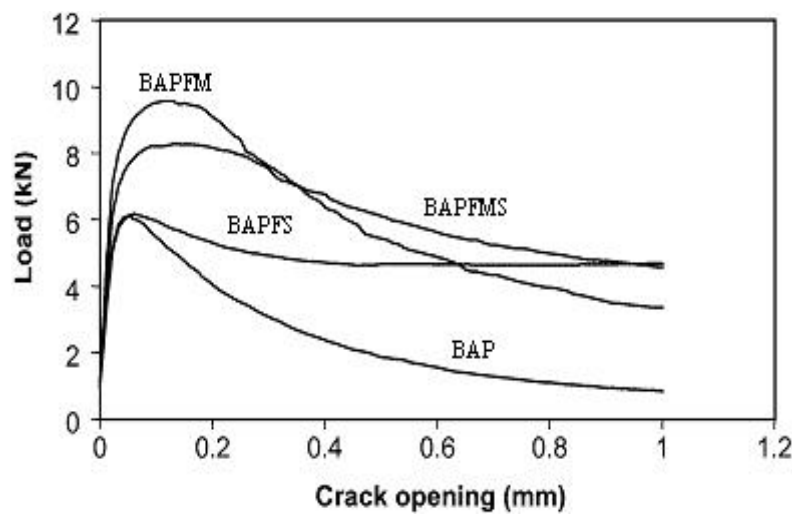


Figure II-15: Comportement à la traction de différentes compositions [17]

II.4.4. Utilisation des BAP fibres dans les structures :

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

➤ Palplanches :

A l'origine, les palplanches étaient réalisées en bois (maintenant en acier). Il s'agissait de pieux faits de planches qu'on enfonçait dans la terre pour former un encaissement dans l'eau. 'SPANBETON', un producteur hollandais d'éléments en béton préfabriqués propose aujourd'hui des palplanches en béton. Ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier.

Comparés à ceux en acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure. Des études ont été réalisées à l'université de technologie de Delft avec pour objectif la production de palplanches précontraintes sans armatures classiques, Le programme était composé de quatre parties:

- étude préliminaire sur les caractéristiques d'un mortier de haute résistance avec les fibres métalliques.

- optimisation d'une géométrie de palplanches, en combinant les aspects structural et économique, (le calcul a montré que les palplanches en bétons autoplçants fibrés seraient économiques si le prix de la composition était inférieur à 450 euros/m³).
- optimisation d'une composition basée sur l'étude de [Sato et al 2000], développée par [Grünewald et al 2002], satisfaisant tous les critères de conception, (plusieurs essais ont été effectués sur les caractéristiques du mélange optimisé à l'état durci).
- faisabilité de la nouvelle palplanche.

La (**Figure II-16**) permet de comparer les palplanches élaborées à base de béton autoplçant renforcé de fibres (D_{ramix} OL 13/0,16, $V_f=125$ kg/m³) à celles à base de béton ordinaire: on remarquera une diminution significative de l'épaisseur des éléments fibrés. [17]



Figure II-16: Palplanches précontraintes à base de mortier autoplçant fibré (a), béton armé ordinaire (b) [17]

Les palplanches précontraintes en béton autoplçant renforcé de fibres présentent plusieurs avantages par rapport celles avec un béton standard : le coulage et le remplissage sont facilités, le stockage exige moins d'espace, et un nombre plus élevé d'éléments peut être transporté avec un camion (plus légers et moins encombrants). Enfin, la mise en place dans la terre est plus aisée (moins de résistance à l'enfoncement dans le sol). [17]

➤ Voussoirs :

Les voussoirs subissent souvent des dommages au cours de la construction. Les fibres, en réduisant la fragilité du matériau, peuvent éviter l'endommagement du béton d'enrobage qui est provoqué par le placement imprécis des voussoirs. Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu.

A titre d'exemples récents et non des moindres, on peut citer les incendies du tunnel du Mont Blanc et du tunnel sous la Manche. Les fibres peuvent contribuer à limiter la détérioration et la désagrégation du béton. L'interface fibre – matrice cimentaire contribue à la décompression du béton (exutoire de la vapeur) et d'autant plus efficacement que les fibres sont réparties dans tout le volume, y compris au voisinage immédiat de la surface de la structure. Des voussoirs

renforcés de fibres métalliques ont été testés avec succès dans plusieurs projets d'infrastructures. Dans la plupart des cas, on peut se passer du renfort de barres, simplifiant ainsi le procédé de production.

Une des études de référence sur les BAP fibrés dans des voussoirs a été menée par [Grünewald et al 2003]. Elle présente deux volets : le procédé de production et l'effet de l'écoulement sur l'orientation des fibres, ainsi que les conséquences de cette orientation sur les caractéristiques mécaniques du béton.

Deux voussoirs ont été réalisés avec des BAP renforcés de fibres et deux différents types de fibres métalliques ont été employés : Dramix 80/60 BN ($L_f/D_f = 80$, $L_f = 60$ mm) et

Dramix 45/30 BN. Les compositions étudiées sont renforcées par 60 kg/m³ de fibres et elles se distinguent uniquement par la géométrie de la fibre utilisée. La composition présentant des caractéristiques d'un BAP, les voussoirs n'ont pas été vibrés. La (Figure II-17) montre la qualité des surfaces après décoffrage d'un voussoir en béton autoplaçant renforcé de fibres. [17]



Figure II-17: Un voussoir à base de BAP fibré [17]

II.4 Conclusion :

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du béton autoplaçant fibré et à son comportement à l'état frais ainsi bien à l'état durci. Rôle des fibres, différent types de fibres.

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées.

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

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés, Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la microfissuration.

Les fibres sont classée selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi par leur propriétés mécaniques.

L'analyse d'Effet des fibres sur l'étalement montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence.

III : Généralités sur les fibres végétales

III.1. Introduction :

L'introduction des fibres naturelles dans des matrices polymères peut apporter des avantages notoires par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites (comme les fibres de verres). Les matériaux composites renforcés par des fibres végétales sont en cours de développement et leurs applications sont encore limitées mais ils sont amenés à jouer un rôle dans le domaine l'industrie future, notamment dans le domaine de la construction. Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. Elles peuvent être classées selon plusieurs critères, leur nature chimique, leur longueur, leur origine.....etc [26].

III.2. Définition des fibres naturelles :

C'est une matière que l'on trouve dans la nature et qui n'a pas besoin d'être transformée avant d'être travaillée [26]. Les fibres naturelles conduisent les composites bistournée, peuvent aussi être classées selon leur origine, végétale et animale, minérale [27].

III.3. Classification des fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont pour la plupart d'origine végétale et animale (**Figure III-1**). Il y a :

- **Végétale** : Extraites de plantes, de fruits et d'arbres comme le coton, le lin, l'agave, le jute, le chanvre, etc [28].
- **Animale** : Extraites de poil d'animaux comme le mouton, la chèvre, le lama, etc [27].
- **Minérale** : On trouve dans la nature des minéraux dont la texture fibreuse. Il s'agit d'une matière toxique, comme l'amiante [28].

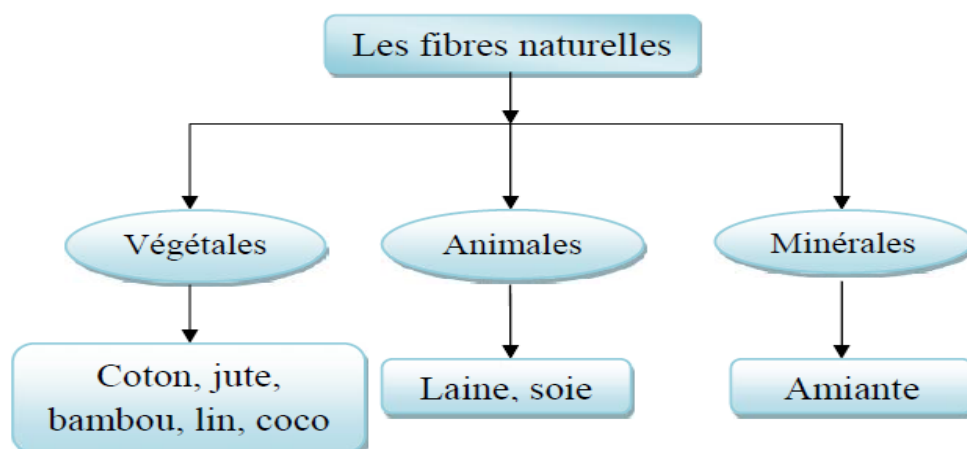


Figure III-1: Classification des fibres naturelles selon à l'origine.

III.4. Définition de la fibre végétale :

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [29].

III.4.1. Classification des fibres végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes (**Figure III-2**) suivant leur provenance. A s'avoir [30] : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

- **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 fibres de tiges**

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité. Ces fibres sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Exemple : fibres de jute, de lin, de ramie, de kenaf, et de chanvre.

- **Les fibres de bois**

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes.

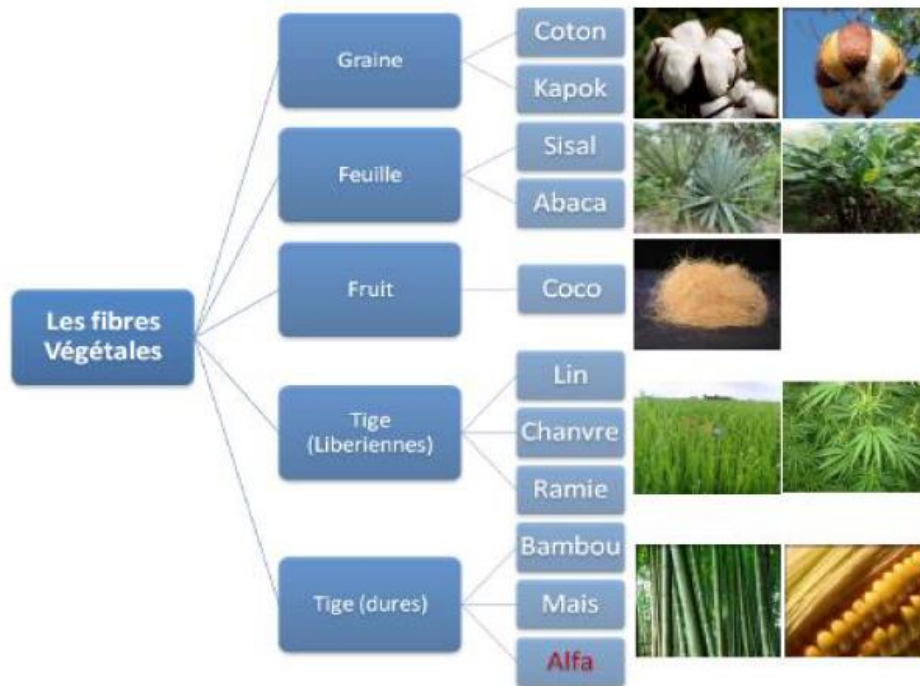


Figure III-2: Classification des fibres végétales selon l'origine [30].

III.4.2. La composition chimique d'une fibre végétale :

La composition chimique varie d'une plante à une autre et dépend de l'espèce, de l'âge de la plante, des conditions climatiques, de la composition du sol et de la méthode d'extraction utilisée [31].

Les différents constituants des fibres végétales (**Figure. III-3**) sont [30] :

- **La Cellulose** : C'est la principale composante des fibres végétales. C'est un polymère naturel du premier plan. Généralement, les fibres végétales sont constituées par une chaîne de fibres en cellulose.
- **Hémicellulose** : L'hémicellulose présente dans toutes les parois de ces fibres. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres.
- **Lignine** : La lignine constitue la colle qui lie les fibres végétales entre elles ainsi que leurs parois. C'est un polymère tridimensionnel.

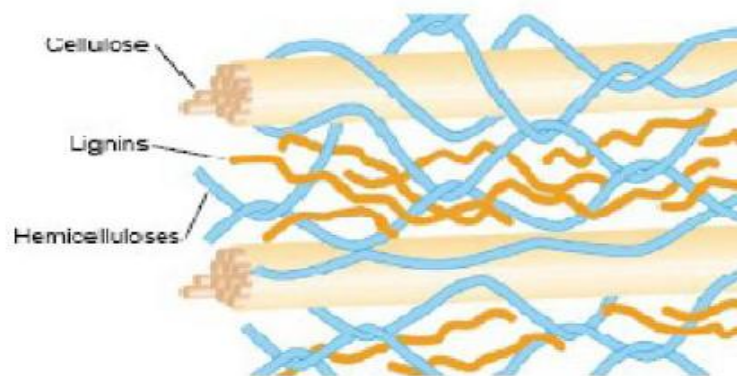


Figure III- 3: Différents constituants d'une fibre végétale.

III.4.3. Propriétés usuelles des fibres végétales :

III.4.3.1. Propriétés physiques des fibres végétales:

Généralement une fibre végétale est caractérisée par son diamètre, sa densité, son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau [30].

III.4.3.2. Propriétés mécaniques des fibres végétales:

Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité [30]. Le (Tableau. III-1) présente les propriétés usuelles des fibres végétales.

Propriétés	Type des fibres							
	lin	chanvre	Jute	ramie	coco	sisal	abaca	coton
Densité	1.4	1.48	1.46	1.5	1.25	1.33	1.5	1.51
Résistance a la traction (Mpa)	800-1500	500-900	400-800	550	220	600-700	980	400
Module d'élasticité (E) (GPa)	60-80	70	10-30	44	6	38		12
(E/densité) spécifique	26-46	47	7-21	29	5	29		8
Allongement a la rupture (%)	1.2-1.6	1.6	1.8	2	15-25	2-3		3-10
Absorption d'eau (%)	7	8	12	12-17	10	11		8-25

Tableau III -1:Propriétés usuelles des fibres végétales [30].

III.4.3.3. Propriétés chimiques des fibres végétales :

Les fibres végétales sont caractérisées par leur composition chimique (**Tableau.III-2**) qui influence énormément sur leur durabilité et spécialement dans les milieux alcalins [30].

Fibres naturelles	Cellulose %	Hémicellulose %	Lignine %	Pectine %	Graisses %	Eau %	Angle de Microfibrille (°)
Chanvre	70-74	17.9-22.4	3.7-5.7	0.9	0.8	6.2-12	2-2.6
lin	71	18.6-20.6	2.2	2.3	1.7	8-12	5-10
Jute	61-71.5	13.6-20.4	12-13	0.2	0.5	12.5-13.7	8
Coton	85-90	5.7	-	0-1	0.6	7.85-8.5	-
Sisal	66-78	10-14	10-14	10	2	10-22	10-22
ramie	68.6-76.2	13.1-16.7	0.6-0.7	1.9	7.5-17	0.3	7.5
Kenaf	45-57	21.5	8-13	3-5	-	-	-
Palmier	41-45	6-10	30-40	-	1.2	-	-
Dattier							
Alfa	45	24	24	5	-	-	-

Tableau III-2: Composition chimique de quelques fibres végétales [33].

III.4.3.4. Propriétés écologiques des fibres végétales [28] :

- La fibre végétale est naturelle et ne cause pas d’irritation pour la peau.
- Plus de confort pendant la manipulation et renouvelables.

III.4.3.5. Autres propriétés spéciales sur les fibres végétales :

La fibre végétale contient plusieurs propriétés fondamentales qui définissent le comportement de la fibre, elle a aussi [33]:

- Bonne absorption des vibrations.
- Fibres moins abrasives.
- Bonne isolation acoustique et thermique.

III.4.4. Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites :

Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel qui est indiquées dans le (**Tableau. III-3**) ci-dessous [32]:

Avantages	Inconvénients
Faible cout	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle
Neutre pour l'émission de Co₂	Mauvaise tenue thermique (200à230°C Max)
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Faible tenue en vieillissement
Pas de résidus après incinération	Fibres anisotropes
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo.....
Demande peu d'énergie pour être produite	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock
Propriété mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité,)	Renfort discontinue
Bonne isolation thermique et acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

Tableau 0-3: Principaux avantages et les inconvénients des fibres végétales [32].

III.5. Les différents renforcements à base de fibres végétales :

Dans la nature il y a plusieurs de plantes végétales, qu'on peut utiliser comme des renforts au niveau de la matrice composite. On trouve :

III.5.1. Le chanvre :

Le chanvre est une fibre libérienne (**Figure. III-4**). Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. La France est le premier producteur de chanvre en Europe, sont généralement transformées en textiles (tapis et vêtements) et en produits industriels comme des géotextiles, de la toile anti-érosion, du renfort de composite et du remplissage. A cause de sa grande solidité et de son intérêt économique [32].



Figure III-4: Plante de chanvre et les fibres de chanvre

III.5.2. Le lin :

Le lin est une plante annuelle (**Figure. III-5**), qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie. La fibre de lin vient des tiges de la plante mais aussi de l'huile extraite des graines. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée, en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut au coton. Cette fibre est utilisée pour fabriquer des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible [32].

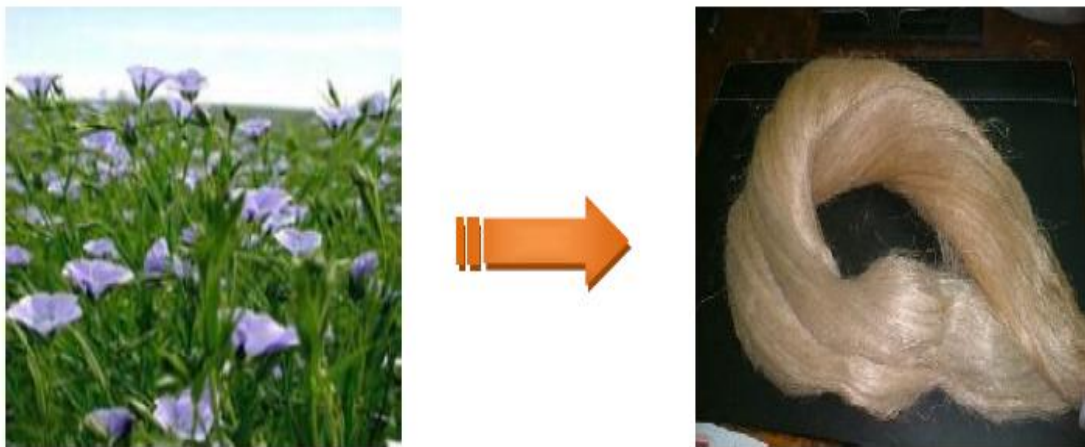


Figure III -5: Plante du lin et les fibres de lin.

III.5.3. Le Coton :

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie. Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Cette fibre (**Figure. III-6**) est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage [32].



Figure III-6: Plante et fibres naturelles de coton.

III.5.4. L'Abaca :

L'Abaca de Manille est un bananier textile qui pousse aux Philippines les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes. La fibre d'Abaca (**Figure. III-7**), a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance[32].



Figure III-7: Plante de l'abaca et fibres de l'abaca.

III.5.5. Le Kenaf :

Le kenaf est une plante herbacée (**Figure. III-8**), dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kenaf est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuilles [32].

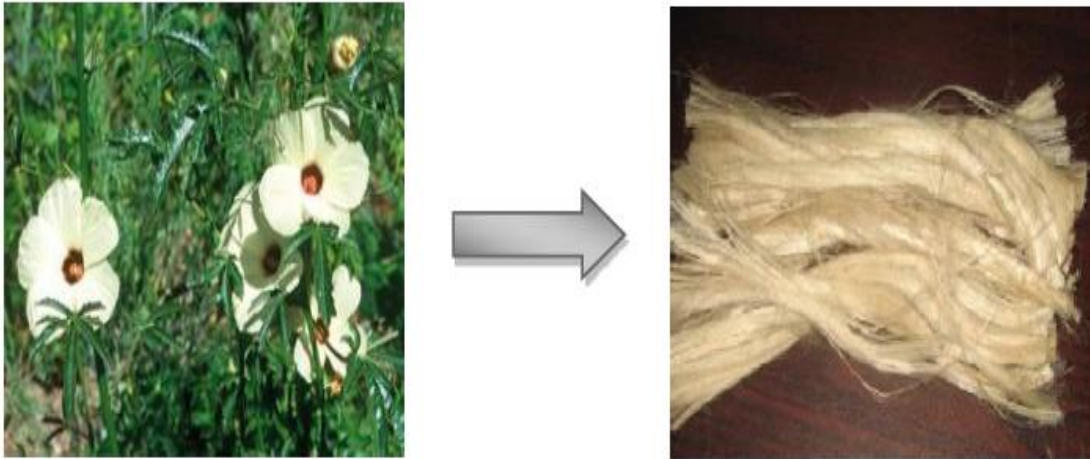


Figure III- 8: Plante de kenaf avec ces fibres.

III.5.6. Le Jute :

Le jute est une plante buissonnante (**Figure. III-9**), originaire du sud-est asiatique. Les principaux producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Les fibres utilisées en papeterie sont les déchets de culture et de filature. La longueur moyenne des fibres est de 2 mm, avec une largeur de 20 μm . Les caractéristiques de ces fibres sont généralement assimilées à celles du kenaf. [32]

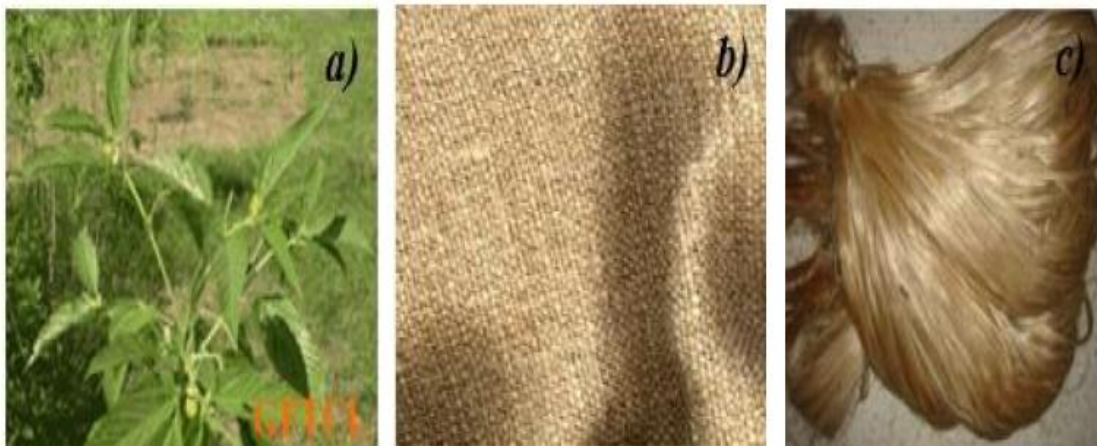


Figure III-9: Jute :(a) plante, (b) tisse, (d) fibre.

III.5.7. Le Sisal :

Le sisal est une plante vivace (**Figure. III-10**), constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm [32].



Figure III -10: fibre naturelles du sisal.

III.5.8. Le Ramie :

La Ramie est une plante arbustive (**Figure. III-11**). Originnaire d'Asie de l'Est, la ramie a pour principaux producteurs la Chine, le Japon et l'Amérique. La longueur moyenne des fibres est comprise entre 40 et 250 mm, pour un diamètre moyen de 45 μm . Ces fibres ressemblent aux fibres de lin mais sont encore plus longues, plus solides et plus rigides [32].



Figure III -11: Plante de Ramie et les fibres naturelles de la Ramie.

III.5.9. Le Coco :

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco (**Figure. III-12**). Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses [32].



Figure III -12: Fibre naturelles de la plante du coco.

III.5.10. Palmier dattier :

Le palmier dattier il a un stipe solitaire de couleur marron ou gris qui atteint jusqu'à 20 mètres de hauteur et 60 cm de diamètre à l'âge adulte (**Figure. III-13**). Leur couronne se compose de plus d'une centaine de feuilles pennées qui mesurent plus de 5 mètres de longueur. Le pétiole peut mesurer jusqu'a un mètre, et est recouvert d'épines sur ses bords. Les folioles sont de couleur verte. Elles sont étroites, rigides et disposées de manière irrégulière sur le rachis [34]. Les types les plus connus sont : Deglette Nour, Dokar, Elghers (appellation locale) [35].

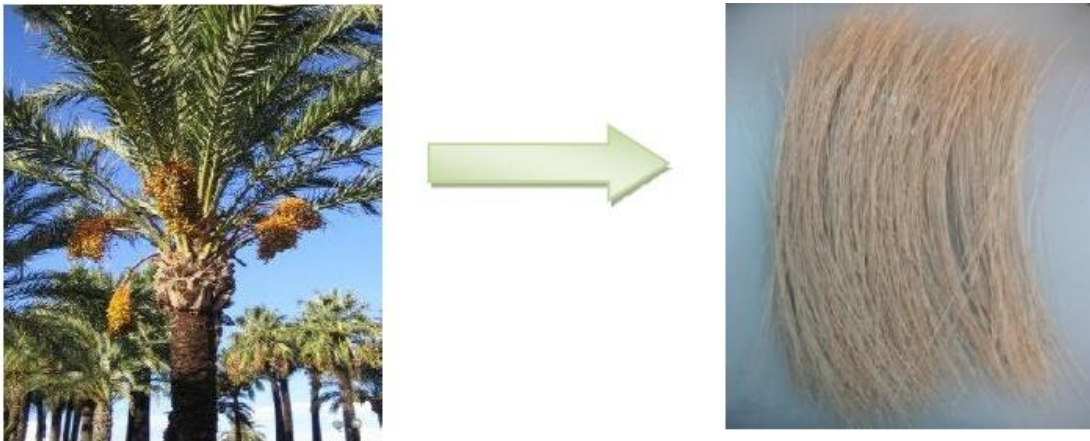


Figure III-13: Palmier et les fibres de palmier dattier.

III.5.11. Alfa :

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m a 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes (**Figure. III-14**). Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence [35]. Elle est employée dans la fabrication de sparterie, des cordages, des espadrilles, des tissus grossiers, des papiers d'imprimerie.....etc [34].



Figure III- 14: La plante et les fibres l'Alfa.

III.6. L'utilisation des fibres végétales dans le domaine de génie civil :

L'application des fibres dans le domaine de construction c'est pour la fabrication des panneaux pour l'isolation et dans l'industrie du bâtiment, la fabrication des enduits et des peintures à base d'huile végétales pour renforcer la durabilité des éléments de construction renouvelables [36].

III.7. Conclusion :

L'utilisation de fibres végétales dans le domaine de génie civil est expansée et prend un champ très large d'application, compte tenu des caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et écologiques, ainsi que grâce à leurs disponibilités dans la nature et trouvent des applications dans le domaine de la construction.

IV. Caractérisation des matériaux utilisés

IV.1 introduction:

Nous présenterons dans ce chapitre, les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection du béton.

Les matériaux utilisés dans le béton :

- Le sable fin de la région de BOUSAADA (OUED MAITAR).
- Le gravies 3/8, 8/16 de carrière située à 25 Km de M'sila, en allant vers B.B.A (COSIDER).
- Le ciment CPJ de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalàa.
- L'ajout : le filler (farine de marbre de fraction 0,08mm).
- Les adjuvants : Le SUPERIOR 126 (super-plastifiant) de la société TEKNACHEM à Zone d'activité 6^{ème} tranche -Sétif.
- L'eau potable du laboratoire.
- Les fibres végétale : l'Alfa (non traité/traité par 3% NaOH) de la région de M'sila.

IV. 2 Caractéristiques des matériaux utilisées:

IV.2.1. Sable :

A) Définition :

On appelle sable, les matériaux de petites dimension issus de désagrégation des roches, le sable est l'élément qui assure au béton et au mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante, il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient des roches, ils sont chimiquement inertes.

B) Classification des sables :

➤ Suivant leurs grosseurs :

Qualité de sable	Grosueur
Sable fin	0.08 à 0.315 mm
Sable moyen	0.315 à 2.00 mm
Sable gros	2.00 à 5.00 mm

Tableau IV-1: Classification des sables suivante leur grosseurs

➤ **suivent leur provenance :**

- sable de rivière : absence de grains fins.
- sable de dune : prédominance de grain fin.
- sable de carrière ou de concassage : composition variable.

➤ **Suivent la valeur du module de finesse :**

On peut classer les sables comme suit :

Sable	Module de finesse (MF)	Refus cumulé sur les tamis 0.633(%)
Gros	3.4 à 2.4	50 à 75
Moyen	2.5 à 1.9	35 à 50
Fin	2 à 1.5	20 à 35

Tableau IV-2: Classification des sables suivant la valeur de module de finesse

C) Caractéristiques physiques de sable utilisés :

Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de Génie civil de l'université de M'sila, suivant les normes français **AFNOR**.

➤ **Masse volumique (absolue) : NF P 18-555 :**

C'est la masse de l'unité de volume de substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

Mode opératoire :

On détermine la masse volumique absolue du sable à l'aide du récipient de capacité **1000** ml. On prend **03** échantillons de masse **300g**.

On place l'échantillon dans le récipient de capacité **1000** ml et on y verse **300** ml d'eau préparé préalablement dans 2^{ème} récipient gradué, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y existe. Après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange sable-eau. Soit (V) ce volume.

Sachant que le volume (V_e) d'eau versé est 300 ml, il serait facile de déterminer le volume occupé par le sable seul.

Volume de sable : **V_I=V-300 (ml)**

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule :

$$P_s = M/V_1$$

$$M = 300g$$

Résultats obtenus :

Essais	M(g)	V(cm ³)	V ₁ (cm ³)	ρ (g/cm ³)	P _{moy} (g/cm ³)
1	300	420	120	2.5	2.5
2	300	419	119	2.52	
3	300	421	121	2.48	

Tableau IV-3: La masse volumique absolue de sable

➤ Masse volumique (apparente) : NF P 18-555

1)- Masse volumique à l'état lâche :

C'est la masse par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

Mode opératoire :

- On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2.5l litres.
- On emplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide de capacité de 0.9l, soit M1 ce poids.
- En place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.
- On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\gamma_{app} = (M2 - M1) / V_R \quad (V_R = \text{volume de récipient})$$

Essais	M1(g)	M2(g)	γ app (g/cm ³)	γ moy (g/cm ³)
1	114	1448	1.482	1.492
2	114	1453	1.487	
3	114	1470	1.507	

Tableau IV -4: La masse volumique apparente à l'état lâche

2)- Masse volumique à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même procédure que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient et le compactage par tassement à 30secousses manuelle, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M2 la masse de l'ensemble (sable + récipient).

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivant :

$$\gamma_c = (M_2 - M_1) / V_r$$

M₁ : la masse de récipient vide.

V_r : volume du récipient.

M₂ : la masse de récipient plus le sable.

Essais	M1(g)	M2(g)	P _c (g/cm ³)	P _{moy} (g/cm ³)
1	114	1619	1.672	1.655
2	114	1591	1.641	
3	114	1600	1.651	

Tableau IV-5: La masse volumique apparente à l'état compact du sable

➤ Porosité et compacité et indice des vides : NF P 554

Pour le sable de Boussaâda.

A/ la porosité par la formule : $P = (1 - \rho_{app} / \rho_{abs}) \cdot 100\%$

B/ la compacité par la formule : $C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 1 - P$

C/ l'indice des vides par la formule : $E = P / C$

Porosité P(%)		Compacité C(%)		L'indice E(%) des vides	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
38.60	32.3	61.53	67.44	0.608	0.482

Tableau IV-6: Porosité, compacité et l'indice des vides

➤ **Equivalent de sable : NF 18-598**

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment + flocculant (**h1**) et du sédiment (**h2**).

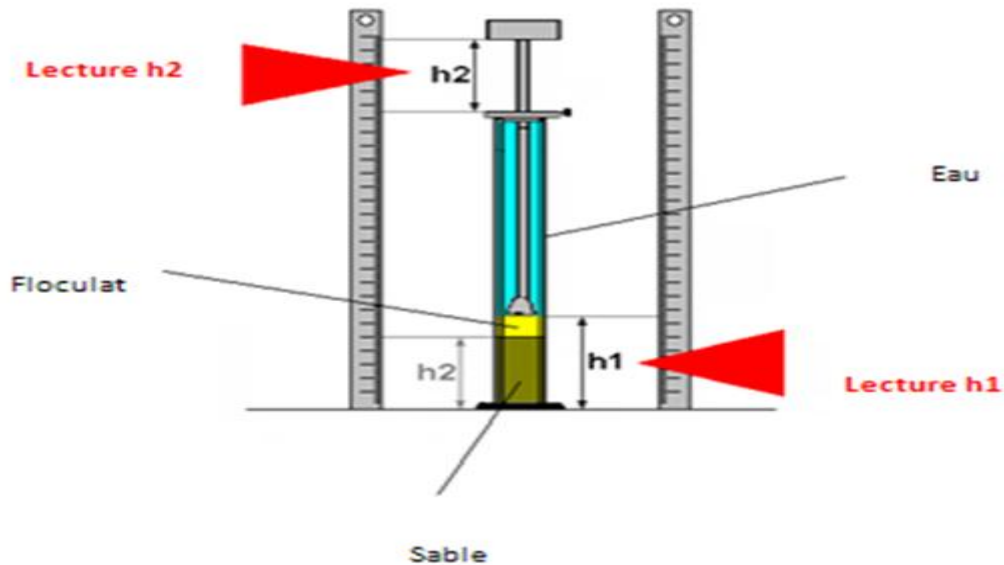


Figure IV- 1: Essais d'équivalent de sable

1)-Equivalent de sable visuel : (E.S.V) :

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.

Mesurer également avec le réglet la hauteur h2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

On: h2 h1

E.S.V = $(h_2 / h_1) * 100$ (%) h_2 : la hauteur du sable.

2)- Equivalent de sable piston : (E.S.P)

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire le règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit h2' la hauteur lue et correspondant à la hauteur de le partie sédimentée.

E.S.P = $(h_2' / h_1) * 100$ (%)

On : h_1 : la hauteur du sable +floculat.

h_2' : la hauteur du sable ($h_2' < h_1$).

Mode opératoire :

- On remplit l'éprouvette de solution lavant jusqu'au trait inférieur.
- A l'aide du récipient de mesure, on introduit une masse sèche de 120 g de matériau dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air.
- On laisse pendant dix minutes, ensuite on agite l'éprouvette à l'aide de l'agitateur électrique afin de boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc à raison de 90 cycles en 30 s.
- Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur.
- Laisser reposer pendant 20 minutes,
- Mesure à l'aide réglé la hauteur h_1 (sable + floculat), et à l'aide de piston la hauteur h_2 (sable).
- Cadence des essais : au nombre de 2.

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

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

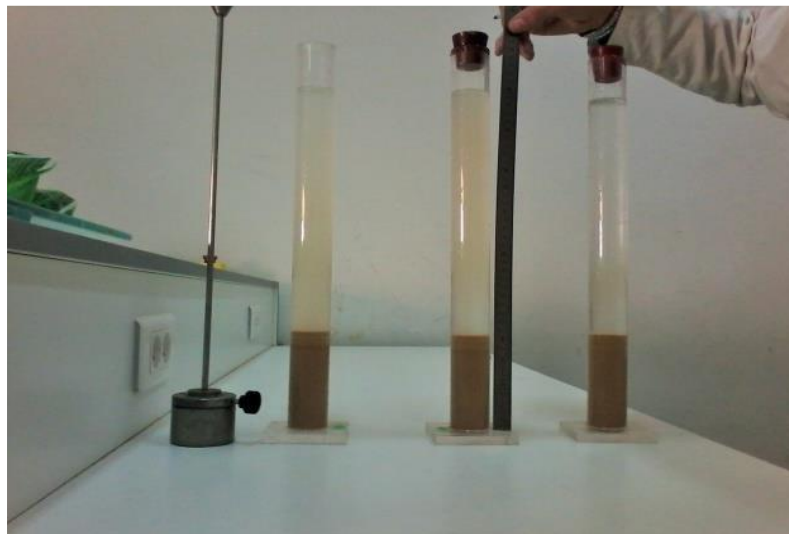


Figure IV- 2: Essai équivalent de sable exécutés au laboratoire

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
E.S < 65	E.S < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < E.S < 75	65 < E.S < 70	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 < E.S < 85	75 < E.S < 80	Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S > 85	E.S > 80	Sable très propre : l'absence totale de fine argileuses risque d'entraîne d'un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

Tableau IV-7: Classification de la nature de sable en fonction d'E.S

Essais	h 1 (cm)	h 2 (cm)	E.S.V (%)	E.S.V_{moy} (%)	h '2 (cm)	E.S.P (%)	E.S.P_{moy} (%)
1	10.3	7.9	76.70	77.92	7.6	73.79	75.65
2	10.2	7.8	76.47		7.6	74.51	
3	10.3	8.3	80.58		8.1	78.64	

Tableau IV-8: Equivalent de sable

Pour sable Boussaâda : c'est un Sables propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.

➤ Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable a la capacité de retenir une grande quantité d'eau, Si son humidité est comprise entre 0 et 3% on le considère comme un sable sec.

Mode opératoire :

- Peser un échantillon de sable humide, soit Mh son poids.
- Mettre le sable dans l'étuve à une température de 100°C environ, et cela pour 24h.
- Peser l'échantillon de nouveau, soit Ms son poids.

$$W = [(M_h - M_s) * 100] / M_s(\%)$$

Ou :

M_s : poids du sable sec en (g).

M_h : poids du sable humide en (g).

Essais	M _h (g)	M _s (g)	W(%)	W moy (%)
1	500	495	1	1.2
2	500	495	1.2	
3	500	495	1.4	

Tableau IV-9: Teneur en eau de sable

➤ **Degré d'absorption d'eau :**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau, elle est définie en pourcentage d'après la formule suivante :

$$A = [(m_2 - m_1) / m_1] / 100$$

Ou :

M₁ : la masse de matériau sec en (g).

M₂ : la masse de matériau saturé d'eau superficiellement sèche en (g).

Essais	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A(%)	A moy (%)
1	300	307.98	2.66	2.67
2	300	308.66	2.88	
3	300	308.86	2.95	

Tableau IV-10: Degré d'absorption du sable Boussaâda

➤ **Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650) :**

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau, elle comprend deux opérations :

1. Tamisage.
2. Sédimentation.

La granularité est exprimée par une courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau, elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- En abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeur croissante.
- En donnée, le pourcentage, en poids du matériau total de la fraction du sable dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passent) on constate que la courbe granulométrique est un élément fondamental de la classification du matériau.

Les résultats de cette étude permettent de prévoir certaines Propriétés du matériau comme la perméabilité, l'aptitude au compactage et l'utilisation comme filtre.



Figure IV-3: Matériels pour l'analyse granulométrique

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 1.5Kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide à 1 g près, soit m_i la masse du tamis.
- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 10 minutes.
- Peser chacun des tamis.
- On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.
- A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g près, soit M_i : la masse de tamis (i) +le sable.
- Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).
- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.
- Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2 ($R_2=R_1 +$ refus partiel sur tamis 2).

Pour suivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules R3 R4.... Rn le tamisât est calculé par la relation :

$$T=100-Rc$$

Ou :

(R_c : refus cumulé en % T : tamisât en%)

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	1	1	0,1	99,9
2,5	26	27	2,7	97,3
1,25	99	126	9,68	87,4
0,63	191	317	17,27	68,3
0,315	457	774	41,67	22,6
0,125	171	945	94,26	5,5
0,08	48	993	99,60	0,7
Fond	6	999	99,9	0,1

Tableau IV-11: Degré d'absorption du sable de Boussaâda

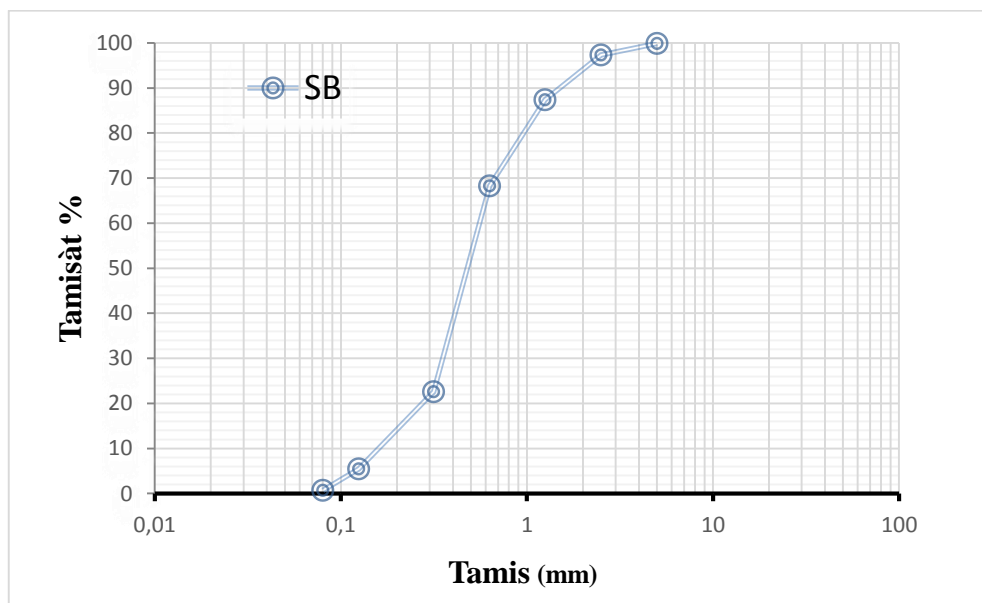


Figure IV-4: Analyse granulométrique du sable de Boussaâda

➤ Module de finesse :

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : **(0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 et 5(mm))** sur **100** et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c / 100$$

Ou : R_c = refus cumulé.

Pour le sable de Boussaâda : $M_f = 2.2$.

Les normes soviétiques spécifient le M_f des sables comme suit :

- Sable gros $M_f > 2.5$
- Sable moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sable fin $1.5 < M_f < 2$
- Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant :

- ✓ Pour le sable de Boussaâda : $2 < M_f < 2.5$: c'est un **sable** moyen.

D) Caractéristique chimique du sable :

La composition chimique de (Oued Maitre) est établie en mars 2009, à la cimenterie Lafarge (M'sila). Elle est donnée au Tableau IV-12

Eléments	Symboles	Teneur en (%)
Silice	SiO ₂	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	0.90
Alumine	Al ₂ O ₃	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Pente de fer	P.A.F	2.81
Sulfate	SO ₃	0.44

Tableau IV-12: Les caractéristiques chimique de sable

Commentaire :

Notre sable est un sable pur à haute teneur en silice.

IV.2.2.Gravier :

Dans ce paragraphe, on présente les caractéristiques du gravier utilisé dans notre étude.

A) Définition :

On appelle « gravier » les matériaux inertes, autres que le sable, qui entrent dans la composition des bétons forment leurs squelettes, tandis que le ciment joue le rôle du liant qui lie les grains de gravier en particulier et granulats en général pour former un corps solide (béton).

On appelle « gravier » l'accumulation des grains de 5 à 70 (150 mm) formés par destruction naturelle des roches (gravier roulé), tandis que la pierre concassée (gravier concassée) est obtenue par broyage des roches massives, de gravier de moellons ou de pierres artificielles en morceaux. En général, on obtient définir le gravier comme des « petits morceaux » de roche destinés à réaliser les ouvrages de génie civil, de bâtiment en travaux publics.

B) Origine de gravier :

Concassage de la roche d'une carrière située à 25 Km de M'sila , en allant vers **B.B.A** (carrière **COSIDER**).

Classes granulaire :

Les fonctions de gravier sont :

- Fraction 3/8
- Fraction 8/16

➤ Résistance à la compression de la roche d'origine :

La roche d'origine est un calcaire compact de la résistance à la compression, égal à 610 g /cm².

C) Caractéristique physique du gravier utiliser:

➤ Masse volumique apparente :

Mode opératoire :

- Sécher le matériau jusqu'au poids constant.
- Peser le récipient à l'état vide (M_1).

- Peser le récipient sur une table et à l'aide d'une pelle le remplir de gravier avec un certain excédent que l'on relève au ras de la surface du récipient. La distance séparant le récipient de la pelle doit être aux environs de 10 cm.
- Peser de nouveau le récipient plein de gravier. Soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante :

$$\gamma = (M_2 - M_1) / V$$

Ou :

V : volume du récipient.

M_2 : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M_1 : poids de récipient à l'état vide.



Figure IV-5: Récipient de mesure en acier pour masse volumique (10L et 7L)

Gravier	Essais	M_1 (Kg)	M_2 (Kg)	γ (Kg/L)	γ_{moy} (Kg/L)
3/8 V=7L	1	2.922	10.306	1.055	1.075
	2	2.922	10.545	1.089	
	3	2.922	10.491	1.081	
8/16 V=10L	1	3.491	14.926	1.144	1.144
	2	3.491	14.891	1.140	
	3	3	14.967	1.148	

Tableau IV -13: Masse volumique apparente du gravier

➤ **Masse volumique absolue**

Le mode opératoire est le même que l'on a utilisé pour la masse volumique absolue du sable.

	Essais	M(g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ (g/cm ³)	ρ _{moy} (g/cm ³)
3/8	1	400	400	560	2.5	2.5
	2	400	400	560	2.5	
	3	400	400	560	2.5	
8/16	1	400	400	550	2.66	2.6
	2	400	400	550	2.58	
	3	400	400	555	2.58	

Tableau IV -14: La masse volumique absolue du gravier

➤ **Compacité, porosité et l'indice de vide : NF P 18-554**

Le mode opératoire est semblable a celui effectuée pour le sable on calcule la porosité selon la formule :

A/ la porosité donnée par formule :

$$\rho = (1 - \gamma_g / \rho_g) * 100\%$$

B/ la compacité donnée par la formule :

$$C = \gamma_g / \rho_g = 1 - \rho$$

C/ l'indice des vides donnée par la formule :

$$E = \rho / (1 - \rho) = \rho / c$$

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice des vides E
3/8	48.77	51.23	0.94
8/16	45.48	54.52	0.83

Tableau IV-15: Porosité, compacité et l'indice des vides

➤ **Degré d'absorption d'eau (gravier) :**

	$M_1(g)$	$M_2(g)$	$A(\%)$	$A_{moy}(\%)$
3/8	700	709.06	1.29	1.29
	700	709.77	1.39	
	700	708.53	1.21	
8/16	700	712	1.71	1.66
	700	711	1.57	
	700	712	1.71	

Tableau IV-16: Degré d'absorption d'eau du gravier

➤ **Teneur en eau du gravier :**

	$M_h(g)$	$M_g(g)$	$W(\%)$	$W_{moy}(\%)$
3/8	500	495	1	0.66
	500	497	0.6	
	500	498	0.4	
8/16	500	496	0.8	0.8
	500	496	0.8	
	500	496	0.8	

Tableau IV-17: Teneur en eau des graviers

➤ **Analyse granulométrique :**

Le même essai d'analyse granulométrique de sable :

- Fraction 3/8
- $M_{G3/8}=1.5$ kg

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
8	13	13	0,87	99,13
6,3	358	371	24,71	75,28
5	393	764	50,899	49,101
4	513	1277	85,076	14,924
3,15	147	1424	94,87	5,13
2,5	58	1482	98,734	1,266
Fond	16.8	1498,8	99,92	0,1

Tableau IV-18: Analyse granulométrique du gravier 3/8

- Fraction 8/16
- $M_{G8/16}=3.2\text{kg}$

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
16	5	5	0.16	99.84
12.5	783	788	24.63	75.37
10	1559	2347	73.34	26.66
8	633	2980	93.13	6.87
6.3	174	3154	98.56	1.44
Fond	55	3200	100	0

Tableau IV-19: Analyse granulométrique du gravier 8/16

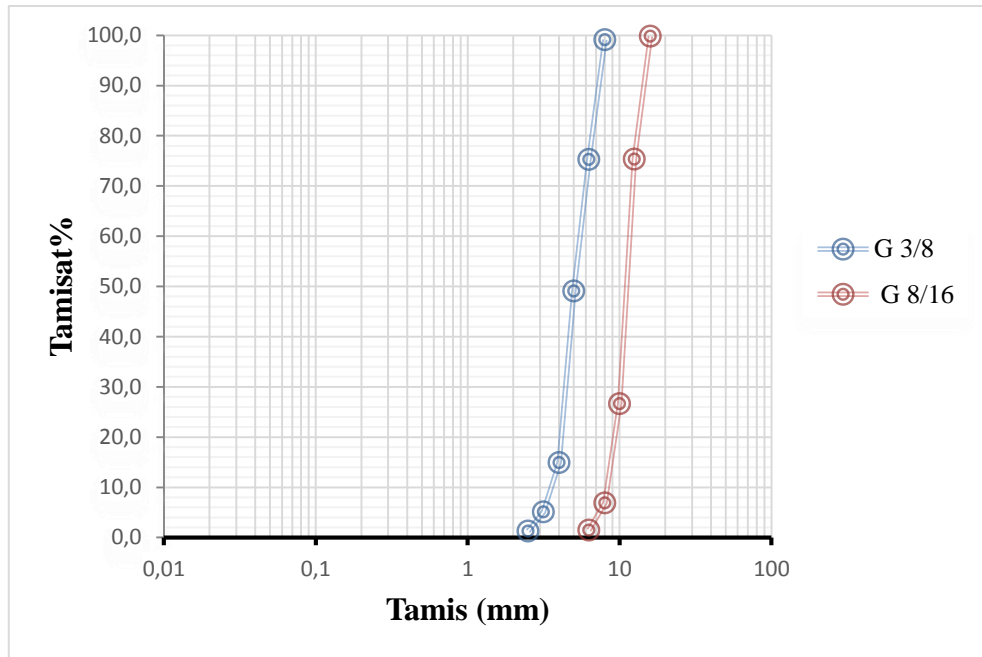


Figure IV 6: Analyse granulométrique du gravier 3/8 et 8/16

D) Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduits émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons.

➤ Essai de résistance au choc (essai Los Angeles) : NF P 18-573

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles (LA), et sur le principe de d'effritement par abrasion.



Figure IV-7: Appareil de l'essai Los Angeles

✓ **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer la masse(M) d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

✓ **Formulation :**

Si (M) est la masse du matériau soumis à l'essai et (m) la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'explique par le coefficient los Angeles L_A :

$$L_A = (m/M) * 100$$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

Gravier	Masse initiale M(kg)	Masse m(kg)	Coeff de los angeles LA (%)
3/8	5	1.050	21
8/16	5	0.950	19.84

Tableau IV-20: Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé

✓ **Classification :**

Un tableau de classification à été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Coefficient L_A	Nature de los Angeles L_A
<20	Très dure
20à25	Dure
25à30	Assez dure
30à40	Mis dure
40à50	Tendre
<50	Très tendre

Tableau IV-21: Classification des roches en fonction du coefficient L_A

Gravier 8/16 : 20<LA <25 dure

Gravier 3/8 : 20<LA <25 dure

E) Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrier COSSIDER est établie en Mars 2004, à la cimenterie ACC de M'sila. Elle est donnée au **Tableau IV-22**

Elément	S _i O ₂	AL ₂ O ₃	C _a O	Fe ₂ O ₃	M _g O	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneur(%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

Tableau IV-22: Analyse chimique du gravier

IV.2.3 Le ciment :

Le ciment utilisé dans cette recherche est portland composé de classe 42.5 provient de la cimenterie Lafarge de M'sila.

Mâtine (CPJ -CEM II/B 42.5) ciment gris pour béton de haute performance destiné à La construction des ouvrages d'art (ponts viaducs, tunnels.....).



Figure IV- 8: Ciment de M'sila (CPJ CEM II/B 42.5)

A) Caractéristique physique :

		Unité	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm ³	3.1
Consistance normale		%	25%
La finesse (blaine)		Cm ³ /g	3000-3200
Le chatelier	A froid	Mim	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	Min	2 :30
	Fin		3.30
Résistance a la compression	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

Tableau IV-23: Caractéristiques physique du CPJ-CEM/42.5

B) Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé:

➤ **Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé:**

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₃	Na ₂ O
Teneur %	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau IV-24: Les compositions chimiques du CPJ

➤ **Les caractéristiques minéralogiques du ciment :**

Eléments	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Teneur %	59	14	6	100

Tableau IV-25: Les compositions minéralogiques du CPJ

IV.2.4 Les Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5% en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du durci, (norme EN 934-2).

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants fabriqués par la société TEKNACHEM à Zone d'activité 6ème tranche – Sétif, à savoir : SUPEROIRE 126 de TEKNACHEM (super-plastifiant).

➤ Le SUPERIOR 126:

SUPERIOR 126, est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permettent de réaliser des bétons très fluides avec des rapports E/C très réduits. Il est compatible avec la majorité des ciments.

Par son action dispersante et la bonne synergie de ses composants il confère au béton un maintien prolongé de l'ouvrabilité avec des bonnes caractéristiques de compacité, résistances mécaniques et chimiques.

A) Propriétés chimiques et physiques :

Etat physique	Liquide
Couleur	Brune
Densité (g/cm ³ , à 20°C)	1,130 ± 0,03
PH à 20°C	5,5 ± 1
Chlorure	< 0,1 %

Tableau IV-26: Propriétés chimiques et physiques du super-plastifiant SUPERIOIRE 126

B) Caractéristiques :

Le SUPERIOR 126 est particulièrement recommandé pour la fabrication de béton à faible rapport E/C, à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances mécaniques élevées à jeune âge avec réduction des retraites et l'obtention de résistances finales élevées. Il donne une excellente imperméabilité et une grande résistance à l'agression chimique.

Le produit peut être formulé pour un long maintien de l'ouvrabilité avec des résistances élevées à la compression et flexion à 28 jours, et une diminution du retrait hygrométrique, avec une excellente finition esthétique et meilleure durabilité.

Le SUPERIOR 126 est donc adapté à l'industrie du béton prêt à l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

C) Domaines d'application :

- Béton à très long maintien d'ouvrabilité.

- Fondations profondes (parois moulés, pieux...).
- Pompages longues distances.
- Bétons de bâtiment.
- Bétons de Génie- Civil (ouvrages d’art, tunnels).
- Bétons à faible rapport E/C.

IV.2.5 Le filler utilisé (marbre) :

Le marbre est une roche métamorphique dérivant par écrasement, élévation de température de roche calcaire composé de calcite et de couleur blanche à l’état pur.

A) Caractéristiques physiques et chimiques du marbre :

Caractéristiques physiques de ce filler (marbre) sont présentées au tableau :

Propriété physiques	Fine marbre
Masse volumique apparent (g/cm ³)	0.83
Densité	2.67
Surface spécifique Blain (cm ² /g)	448

Tableau IV-27: Caractéristiques physiques du marbre

Composition chimique est établie en 12 avril 2010 à la cimenterie Lafarge de M’sila. Elle donnée par le tableau suivant :

Analyse chimique	Fines marbre
SiO₂	1.47
CaO	55.3
MgO	0.01
Fe₂O₃	0.14
Al₂O₃	0.35
Na₂O₃	0.12
K₂O	0.04
So₃	0.01
Pert de feu	42.56

Tableau IV-28: Caractéristiques chimiques du marbre

IV.2.6 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

A) Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/2005, au laboratoire de chimie (M'sila). Elle est donnée par :

La mesure	Teneur en (mg/l)
Le temps de prise d'échantillon	10/05/2005(9 :25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl ⁻	234.3
Sulfate So ₄ ⁻	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Sodium Na ⁺	/
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

Tableau IV -29: Caractéristique chimique de eau de gachage

IV.2.7 Fibres d'Alfa :

Les fibres Alfa (*Stipa tenacissima* L.), sont récoltées de la région de Bou-Saadâ (Algérie). Elles sont une touffe d'herbe, constituée de tiges de forme cylindrique d'une hauteur maximale d'environ 1m avec une surface spécifique de 3m²/g. Les fibres Alfa sont principalement composées de 45% de cellulose, 24% d'hémicellulose, 24% de lignine, 2% de cendres et de 5% de cire. Les faisceaux de fibres Alfa sont caractérisés par un diamètre moyen de 113 µm (90-120µm) et une densité de 0,89 g.cm⁻³.

A) Prétraitement des fibres Alfa:

Les fibres Alfa récoltés sont lavées avec de l'eau pour éliminer la saleté adhérente. Par la suite, elles sont séchées à l'air libre pendant 72 heures et à température ambiante. Ensuite elles sont coupées en longueur (entre 1 à 2.5cm). Cette opération est suivie d'un broyage. Le principe de

broyage consiste à écraser les fibres Alfa sans détruire les fibrilles. Les fibres obtenues sont désignées fibres non traitées.



Figure IV 9: Préparation des fibres Alfa: immersion des tiges dans l'eau

B) Traitement des fibres Alfa:

Les fibres Alfa sont traitées avec des solutions de NaOH à concentration (3 %) et durant 5 h. Le but de ce traitement est l'élimination de certaine quantité de lignine, de cire et d'impuretés qui recouvrent la surface externe des fibres. Après traitement, les fibres sont rincées à l'eau distillée. Les traces de NaOH sont neutralisées par une solution d'eau distillée à 2% d'acide sulfurique durant 10 min.



Figure IV- 10: Traitement de fibre Alfa par 3% NAOH



Figure IV- 11:(a) Traitement d'Alfa par H_2SO_4 éliminé les trace de NaOH, (b) Fibre d'Alfa Traitées

Après toutes les étapes de préparation et l'extraction de fibres Alfa, on place les fibres obtenues dans une étuve de séchage à température $70^\circ C$ (Figure IV-12) durant 5h pour améliorer leurs propriétés mécaniques.



Figure IV- 12: Etuve de séchage à $70^\circ C$

La fibre Alfa est ensuite découpées (Figure IV-13) en différentes longueurs (entre 1 à 2,5) pour assurer leur distribution et leur homogénéité lors de l'élaboration du béton autoplaçant.

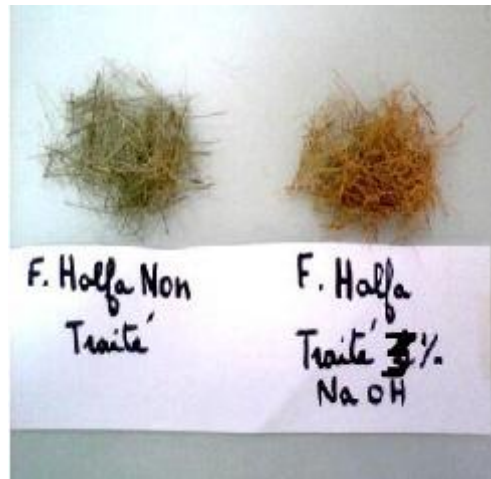


Figure IV-13: Alfa traité et non traité

IV.3 Conclusion :

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des bétons qui seront étudiés au chapitre suivant de point de vue rhéologique et mécanique.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.

V. Techniques expérimentales :

V.1. Introduction :

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant: sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ses trois principales caractéristiques:

- la fluidité
- l'homogénéité
- la robustesse.

En plus de la capacité. à se compacter de lui-même, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité, et la résistance envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant la mesure de l'étalement (Slump Flow).

V.2. Formulation du béton autoplaçant :

Notre formulation des BPA a été faite d'après AFGC (Association Française de Génie Civil). Avant de procéder à la formulation de notre béton on fixe les 05 caractéristiques :

- Le rapport E/C.
- Le rapport F/C.
- Le dosage en super-plastifiant.
- Le rapport G/S.

Les valeurs en été choisis d'après AFGC, elles sont les même pour 09 bétons (BAP).

Le tableau suivant affiche ces valeurs :

Caractéristiques	valeurs
Le rapport E/C	0.5
Le rapport G/S	1
Le rapport E/(C+F)	0.38

V.2.1. La composition des différents bétons:

Nous avons confectionnés 9 mélange différents des bétons (BAP) et nous avons utilisés les abréviations suivantes :

BAP : béton autoplaçant témoin sans fibre.

BAP1 : béton autoplaçant avec 0,1% de fibre Alfa de 1cm de longueur.

BAP2 : béton autoplaçant avec 0,15% de fibre Alfa de 1cm de longueur.

BAP3 : béton autoplaçant avec 0,1% de fibre Alfa de 2.5 cm de longueur.

BAP4 : béton autoplaçant avec 0,15% de fibre Alfa de 2.5 cm de longueur.

BAP_T 1: béton autoplaçant avec 0,1% de fibre Alfa traitée de 1 cm de longueur.

BAP_T 2: béton autoplaçant avec 0,15% de fibre Alfa traitée de 1 cm de longueur.

BAP_T 3 : béton autoplaçant avec 0,1% de fibre Alfa traitée de 2.5 cm de longueur.

BAP_T 4 : béton autoplaçant avec 0,15% de fibre Alfa traitée de 2.5 cm de longueur.

V.2.2. La composition d'un 1m³ de béton :

	BAP (kg/m ³)
Sable	800
Gravier 3/8	400
Gravier 8/16	416
Ciment	400
Eau	194.72
Super-plastifiant	8.8
Filler (marbre)	40

Tableau V-1: Les compositions d'un m³ de béton

V.3 Procédure de fabrication des éprouvettes :

Les éprouvettes ont été fabriquées au laboratoire des matériaux de constructions (MDC) du département de génie civil à l'université de M'sila et les tests sont effectués semi du même laboratoire

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur (figure V-3) utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant :

- _ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatique cubique nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- _ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- _ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, si non les sécher préalablement dans l'étuve.
- _ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super-plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- _ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur.
- _ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- _ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- _ Ajouter la trois quart d'eau graduellement.
- _ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- _ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

Pour les BAP avec les fibres en effectuer les mêmes étapes de préparation puis on ajout la quantité des fibres en pluies avec malaxage de 4 min.



Figure V-1 : Malaxeur à béton au laboratoire des (MDC).

V.4. Essais de caractérisation du béton autoplaçant à l'état frais :

Dans la suite du document seront présentés les essais proposés par L'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

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

V.4.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8:

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow). 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 œuvre. Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier. [2]

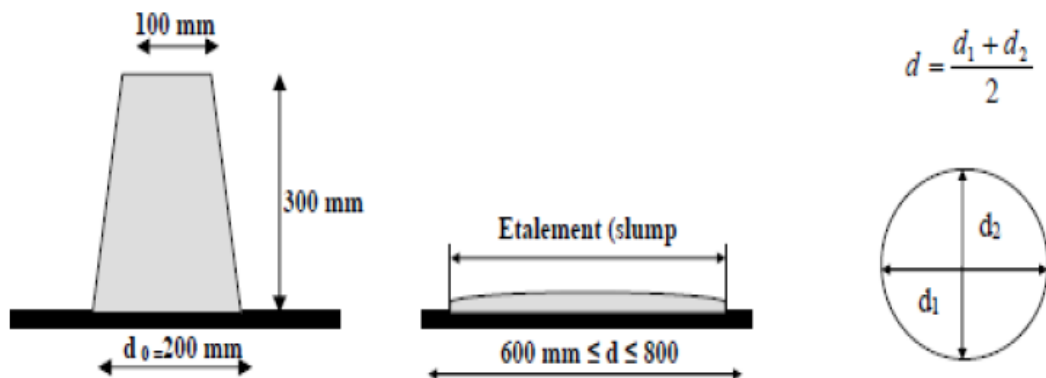


Figure V.2 : Essai d'étalement au cône d'Abrams.

- **Objet d'étalement (slump flow) :**
 - L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.
- **Matériel nécessaire :**
 - Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
 - Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
 - Mètre ou règle de 90 cm.

➤ **Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux cotés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doivent être invalidé et reconduit.

Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur. [2]



Figure V-3 : Essai d'étalement au cône exécuté au laboratoire.

V.4.2. Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11:

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il 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%. [2]



Figure V-4 : Essai au tamis.

➤ **Objet de l'essai :**

Cet essai vise à qualifier les bétons auto-plaçant vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton auto-plaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. [2]

➤ **Matériel utilisé :**

- Seau de 10 L + couvercle.
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond.
- Balance : précision minimale 20 g, portée minimale 20kg.



Figure V-5 : Essai Stabilité au tamis exécutés au laboratoire.

➤ **Mode opératoire :**

- Echantillonnage :
- En laboratoire : Malaxer, verser directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement <30s.
- Sur chantier, BPE amené par camion malaxeur : Malaxer à grande vitesse pendant 1 minute.
- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 mn.
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Peser le fond seul.
- Poser tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire de ressuaage à la surface du seau après les 15mn.
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg - tolérance ± 0.2 kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.

Peser le fond avec la laitance :

- On à : $P_{\text{laitances}} = P_{\text{fond}} + \text{laitance} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.

- $\delta = (P \text{ laitance}/P \text{ échantillon}) \cdot 100$. [2]

Critères d'acceptabilité :

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton auto-plaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton auto-plaçant de la façon :

- $0\% \leq \%P \text{ laitance} \leq 15\%$ **stabilité satisfaisante.**
- $15\% < \% P \text{ laitance} \leq 30\%$ **stabilité critique** (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- $\% P \text{ laitance} > 30$ **stabilité très mauvaise** (ségrégation systématiquement, béton inutilisable). Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable. [2]

Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité.

V.4.3. Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10:

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. 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. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de BAP. [Remplissage H2/H1. Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.

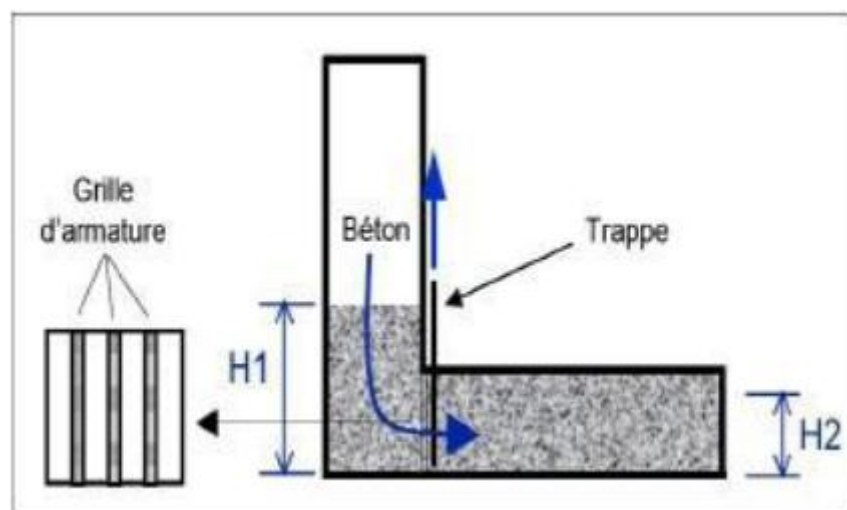


Figure V-6 : Essai de boit L.

Objet de boîte en L :

La boîte en L permet de tester la mobilité de béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Matériel utilisé :

Figure V-7 : Essai de Boîte en L exécutés au laboratoire.

Mode opératoire :

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 en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 (**figureIV.7**) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage $H2/H1$.

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

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton. [2]

V.4.4.La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6:

Voir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant sa le volume de l'éprouvette.

C'est-à-dire : $\rho = M/V$.

La masse volumique exprimée en kg/dm³ car-la densité.

V.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci :

V.5.1. Essai compression NF EN206-1 :

But de l'essai :

- Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.
- L'essai se fait sur une éprouvette cylindrique de dimensions normalisées et d'éclatement de 2. (H= 2 Ø) ou éprouvette cubique 10x10x10. Les dimensions les plus utilisées sont : H= 32 cm Ø = 16 cm. [2]

Principe de l'essai :

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 C°.
- Le démoulage se fera après un 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 28 jours.



Figure V-8 : Presse hydraulique de compression.

Conduite de l'essai :

- Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de béton.
- Eprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture. Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon. Soit F cette lecture.

Calculs :

La résistance sera: $G = \frac{F}{S}$

- S : section de l'éprouvette : 100 cm².
- F : force au moment de la rupture.

Et essai se fait également sur les roches que l'on doit tailler au préalable sous forme de cubes d'arête égale à 7 cm.



Figure V-9: Essai de compression

V.5.2. Essais de traction par flexion: NF P18-408**But de l'essai :**

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prismatique (7x7x28cm³) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.

Conduite de l'essai :

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction. La contrainte limite qui découle d'un calcul classique de résistance des matériaux en

élasticité est σ_{ff} (contrainte de traction par flexion). Le matériau béton n'ayant pas un comportement élastique au voisinage de la rupture, il convient d'apporter au calcul de la résistance en traction du béton σ_t un terme correctif de 0,6 ($\sigma_t = 0,6 \sigma_{ff}$). [2]

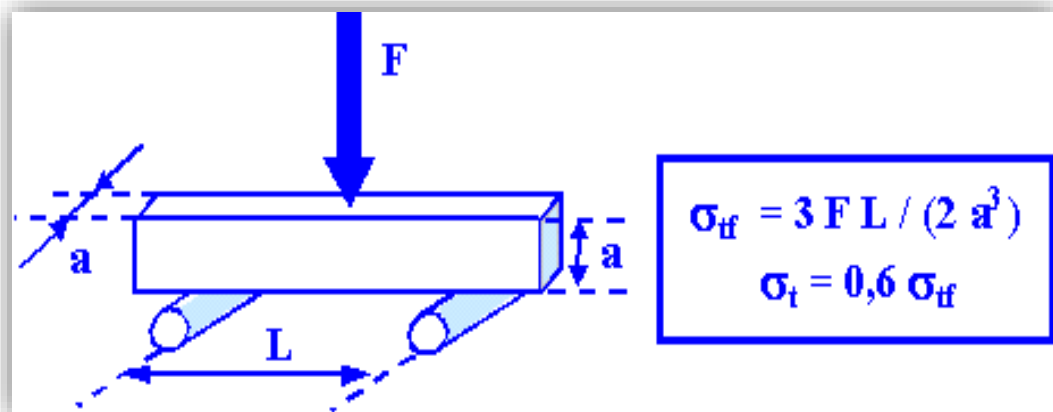


Figure V.10 : Formule de calcul de la résistance de traction



Figure V-11 : Essai de traction par flexion

V.5.3. Module d'élasticité :

Objectif :

- Pour de petites déformations du béton, la courbe contrainte- déformation peut être assimilée à une droite. Il y a approximativement proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ε . Soit E ce coefficient de proportionnalité: [2]

$$\sigma = E * \varepsilon$$

E : est appelé module d'élasticité.

La formule réglementaire du module:

$$E_{ij} = 11000 f_{CJ}^{1/3}$$

V.76 Confection des éprouvettes :

V.6.1 Type et tailles des moules :

Les moules (**figure V- 12**), utilisés pour la confection des éprouvettes sont des moules en acier et plastique de forme :

- Cubique (10x10x10 cm³).
- Prismatique (7x7x28 cm³).



Figure V-12: Moules utilisés.

Le démoulage de toutes les éprouvettes a été effectué 24h après le coulage puis conservées sous l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ (figure IV-13).



Figure V-13 : Conservation des éprouvettes.

V.7 Conclusion :

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux, le matériel utilisé dans notre travail et les essais qui ont été effectués dans laboratoire, la méthode utilisée est la méthode dite " AFGC", utilisée pour le calcul des masses des composantes du béton autoplaçant de référence.

La méthode de formulation AFGC par sa simplicité dans l'application (exige moins de compétence et de matériels) a prouvé son efficacité pour la formulation des BAPF, avec l'obtention de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques, elle peut être donc utilisée comme une méthode principale dans la formulation des BAPF.

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications.

Dans cette partie, on s'intéresse à l'étalement du béton autoplaçant on utilisant le cône d'Abrams. Puis la fluidité (la capacité de remplissage) on utilisant la boîte en L et la résistance à la ségrégation par l'essai de stabilité au tamis, avec les essais destructifs de compression et de traction par flexion de 7, 14 et 28 jours

VI : Résultats et analyses

VI .1. Introduction :

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres Alfa (Fibres Alfa traités et non traités) avec différentes dimensions ($L=2.5$ et $L= 1$ cm) et différents pourcentages de fibres de 0,15, de 0.1 en volume pour la formulation de béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa traités et pour les pourcentages des fibres de 0.1 de 0.15 pour béton autoplaçant renforcé de fibres de Alfa non traités afin de voir l'influence de traitement, les dimensions et les pourcentages de fibres sur les propriétés du béton autoplaçant fibré à l'état frais et à l'état durci.

VI.2. Présentation de résultats à l'état frais:

A partir des mélanges obtenus, il faut procéder à différents essais afin de caractériser les BAP confectionnés. Pour cela, nous utilisons les tests recommandés par l'AFGC [2].

❖ béton témoin :

Le tableau suivant présente les caractéristiques rhéologiques du béton après malaxage :

Essais	Résultats	Unités
Etallement	69	Cm
Stabilité au tamis	10,4	%
Boîte en L (H2/H1)	0.89	/

Tableau VI -1 : Caractéristiques rhéologiques du BAP

D'après les résultats obtenus, les bétons autoplaçant (BAP) confectionnés présentent d'excellentes propriétés rhéologiques qui sont conformes aux exigences prescrites par l'AFGC.

Ces excellentes propriétés sont dues à l'action du super-plastifiant à dé flocculer et disperser les grains du ciment qui sont directement liées à l'adsorption de poly carboxyle à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.

Ce mécanisme d'action est dû à sa composition chimique qui est constituée des chaînes latérales greffées en plus des chaînes principales longues (masse molaire élevée).

Lorsqu'il s'adsorbe sur un grain du ciment, ses fonctions acides dissociées, modifient les charges de surface de la particule et minimisent les interactions entre les particules par la force de répulsion.

Les résultats sont représentés sur les tableaux suivants :

Les essais	Désignation des bétons								
	BAP	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP _{T1}	BAP _{T2}	BAP _{T3}	BAP _{T4}
L'étalement (cm)	69	65.5	63.5	62.75	60.5	67.5	65.75	64.5	62.5
Taux de remplissage (H ₂ /H ₁)	0.89	0.61	0.57	0.53	0.47	0.71	0.66	0.63	0.59
Masse volumique (kg/m ³)	2310	2317	2321	2322	2333	2316	2323	2324	2334
Indice de ségrégation %	10.4	8.65	8.5	7.3	7	8.71	8.53	7.9	7.34

Tableau VI-2 : Résultats d'essais sur le béton frais

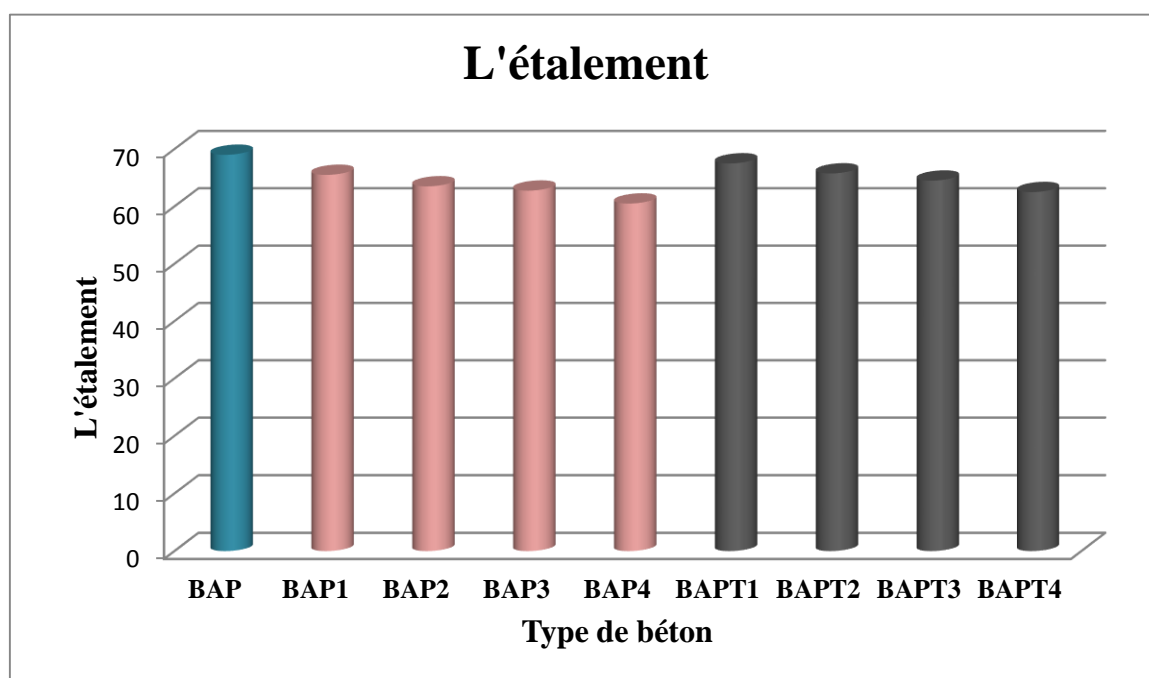


Figure VI-1 : L'étalement en fonction de type de béton

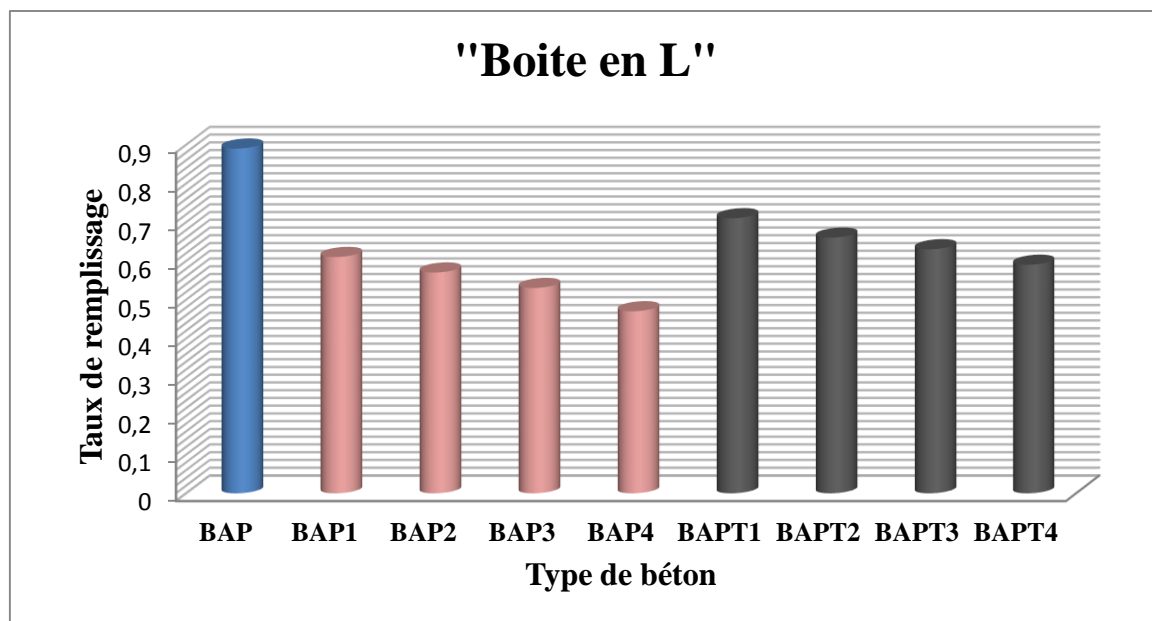


Figure VI-2 : La boîte en « L » en fonction de type de béton

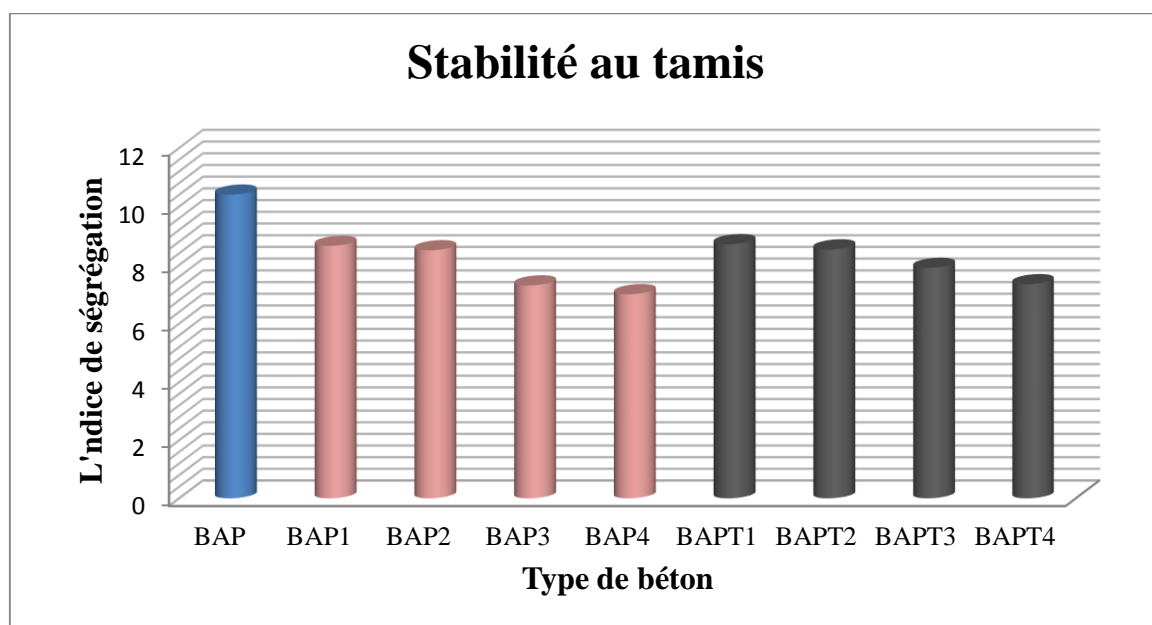


Figure VI-3 : Stabilité au tamis en fonction de type de béton

Commentaire :

Les compositions des bétons autoplaçant donnent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage qui constituent d'ailleurs ses spécificités.

L'étude du béton autoplaçant à l'état frais basée sur les essais d'étalement, la boîte en L, stabilité au tamis, donne des résultats qui correspondent aux critères des recommandations provisoires.

Les étalements des bétons autoplaçant testés sont supérieurs à 60 cm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considéré comme satisfaisante.

Le tableau ci-dessus présent les caractéristiques rhéologiques des BAP confectionné, ces résultats montrent que les formulations sont conformes à la réglementation.

Donc pour l'influence des dimensions de fibres Alfa de pourcentage et de traitement sur les propriétés rhéologiques du BAP on peut conclure que :

Avec un pourcentage fixe (0.1%) ou bien (0.15%) les fibres Alfa courtes et longues traités et non traités n'influent pas sur les propriétés rhéologiques et on peut obtenir un bon étalement avec une meilleur stabilité au tamis mais pour la capacité de remplissage il y a une diminution dans l'essai de la boîte en L surtout pour BAP avec le pourcentage (0.15%) des fibres Alfa non traités longues (BAP4 : $H_2/H_1=0,47$).

Alors la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes mieux qu'à fibres langues.

Avec une longueur fixe (1cm) ou bien (2,5cm) les pourcentages des fibres Alfa traités et non traités respectant le critère d'étalement (compris entre 60 et 75cm) malgré la légère diminution de fibre (0.15%). Nous avant trouve des bon résultats aussi pour l'essai stabilité au tamis (stabilité satisfaisante) et on remarqués toujours un problème de la capacité de remplissage (boîte en L) pour le BAP avec pourcentage (0.15%) nous avant une diminution de 47.19% par rapport le béton au référence ($H_2/H_1= 0.89$)

Alors la performance du béton autoplaçant avec les fibres (0.1%) mieux qu'à fibres (0.15%).

Comme la fluidité et la facilité de mise en œuvre de béton autoplaçant jouent un rôle essentiel dans ses propriétés, nous avons incorporé un 0.1% de 0.15% des fibres Alfa traités et non traités par rapport le volume de mélange.

Et avec cette quantité dans le cas de béton autoplaçant (avec fibres non traités) nous obtenue une légère diminution les propriétés rhéologique par rapport béton autoplaçant (avec fibres traités).

Donc on peut conclure que la présence de fibres Alfa traitées par 3% NaOH joue un rôle et elle à une influence sur l'aspect rhéologique des bétons BAP, contrairement à la longueur qui ne pose pas de problème.

Dans le cas de la stabilité au tamis l'utilisation de fibres traitées influe positivement sur cette dernière.

Alors la performance du béton autoplaçant avec les fibres traités mieux qu'à fibres non traités.

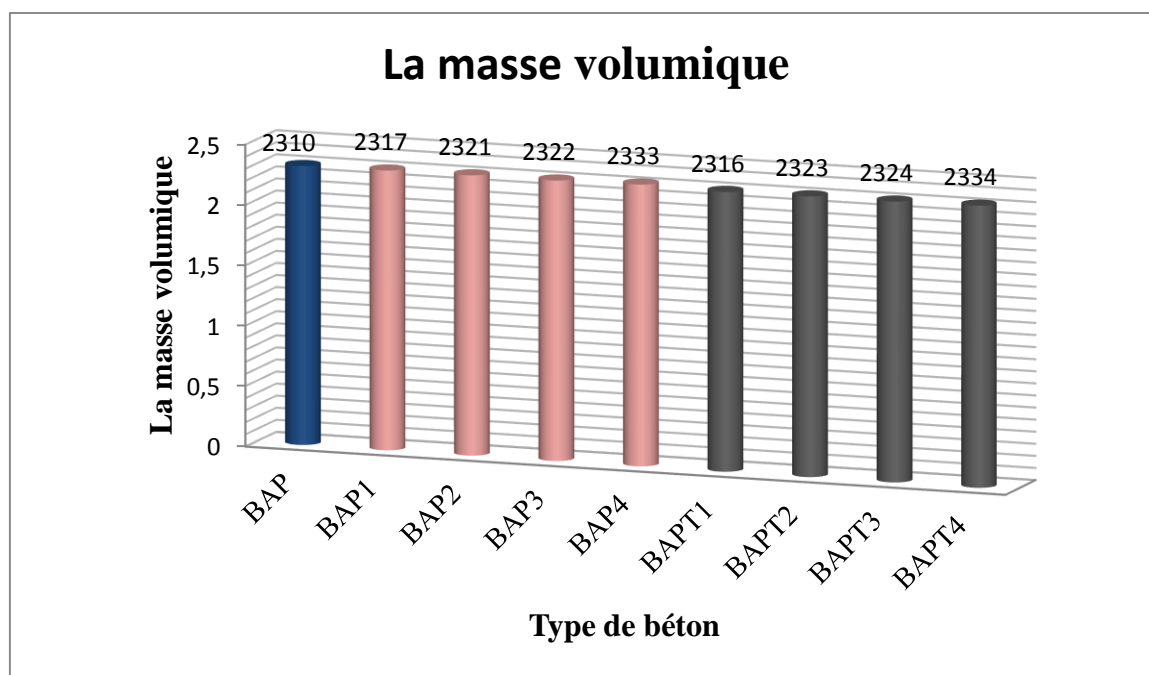


Figure VI-4 : La masse volumique en fonction de type de béton

Commentaire :

L'incorporation des fibres Alfa n'influence pas sur la masse volumique par ce que leur masse volumique des fibres est très réduite par rapport à celle des autres composants du béton.

VI.3. Présentation de résultats à l'état durci:

❖ **béton témoin :**

Résistance a la compression			
Age (jours)	7j	14j	28j
R _c MPa	26,83	29.32	31.77
Résistance a la flexion			
Age (jours)	7j	14j	28j
R _c MPa	4.60	5.2	6.02

Tableau VI -3 : Caractéristiques mécaniques du BAP

VI .3.1 Influence de la longueur de fibres :

Les résultats sont représentés sur les tableaux suivants :

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa non traités (pourcentage de 0.1%) :**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression (MPa)			R a la traction par flexion (MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP1	30,48	32,58	37.96	6.15	6.61	7.43
BAP3	29.32	31.68	34.90	5.8	6.2	6.61

Tableau VI-4: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues et courtes) : pourcentage de 0.1%

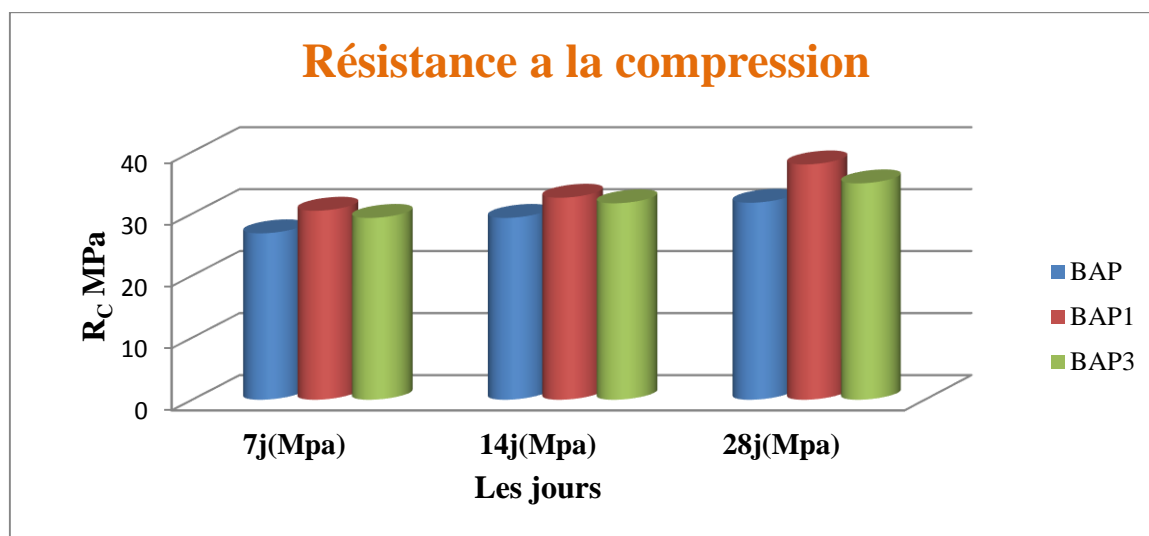


Figure VI -5 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.1%)

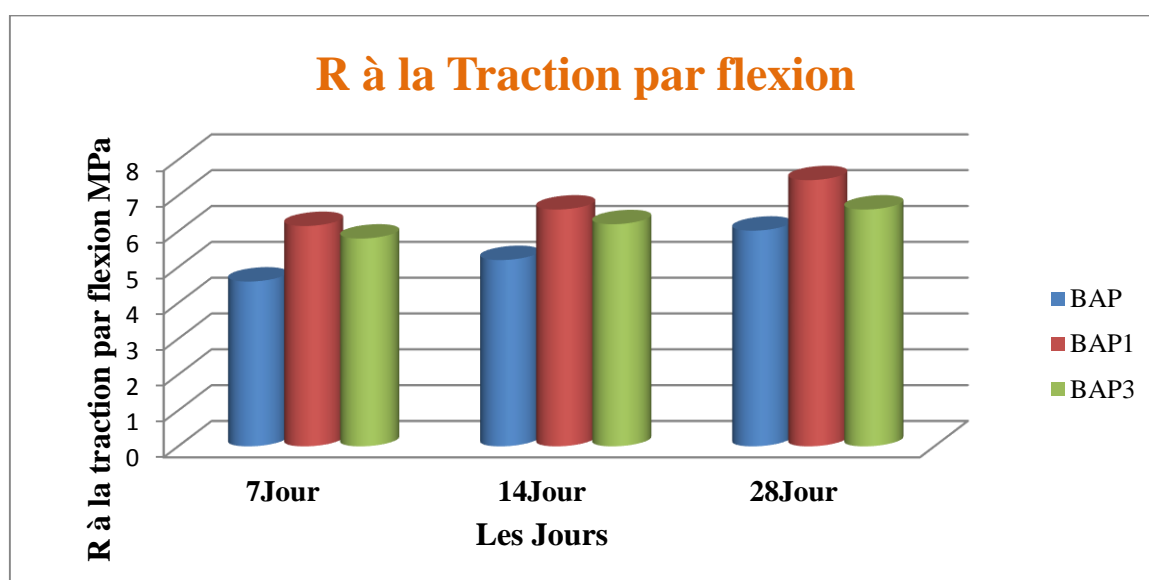


Figure VI -6 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.1%)

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par de fibres Alfa non traités courtes (1cm) et longues (2.5cm) avec un pourcentage de 0.1% en volume pour la formulation du béton autoplaçant

D'après les résultats inscrites dans le tableau et les figures ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 19.48% dans la formulation contenant des fibres Alfa non traités courtes, et de 9.85% pour celle qui contient des longues.

Concernant la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de 23.42% pour la formulation qui contient des fibres de végétale non traités courte, et de 9.80% pour celle qui contient des fibres Alfa non traités longues.

Alors la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes mieux qu'à fibres longues.

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa non traités (pourcentage de 0.15 %) :**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion (MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP2	29,63	31.87	35.85	6.15	6.52	7.34
BAP4	28,78	30,99	33,45	4.69	5.82	6.2

Tableau VI-5 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues et courtes) : pourcentage de 0.15%

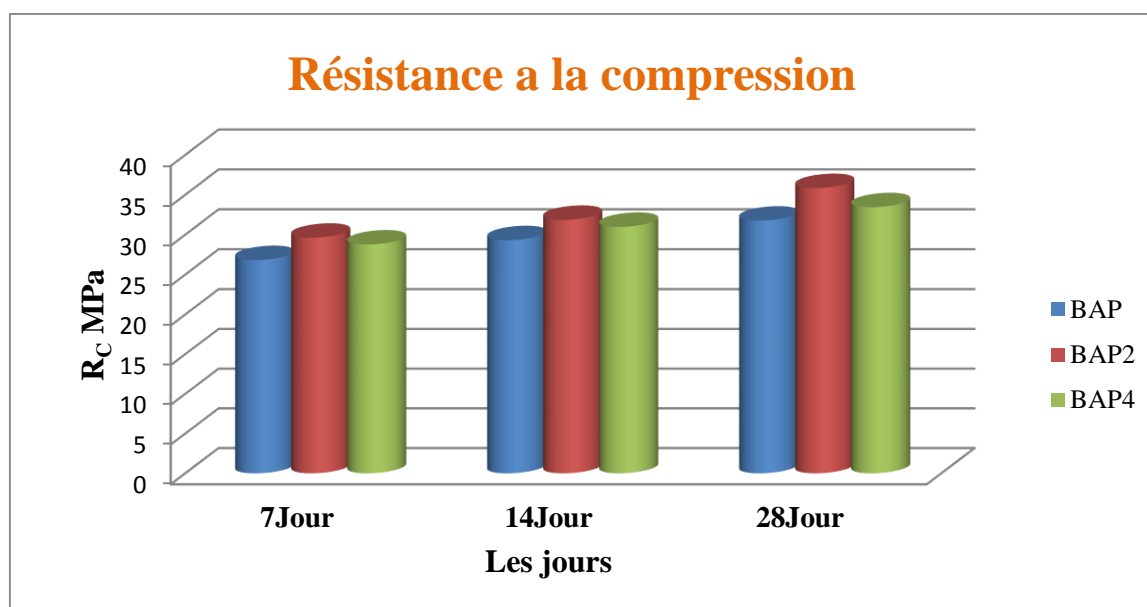


Figure VI -7 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.15%)

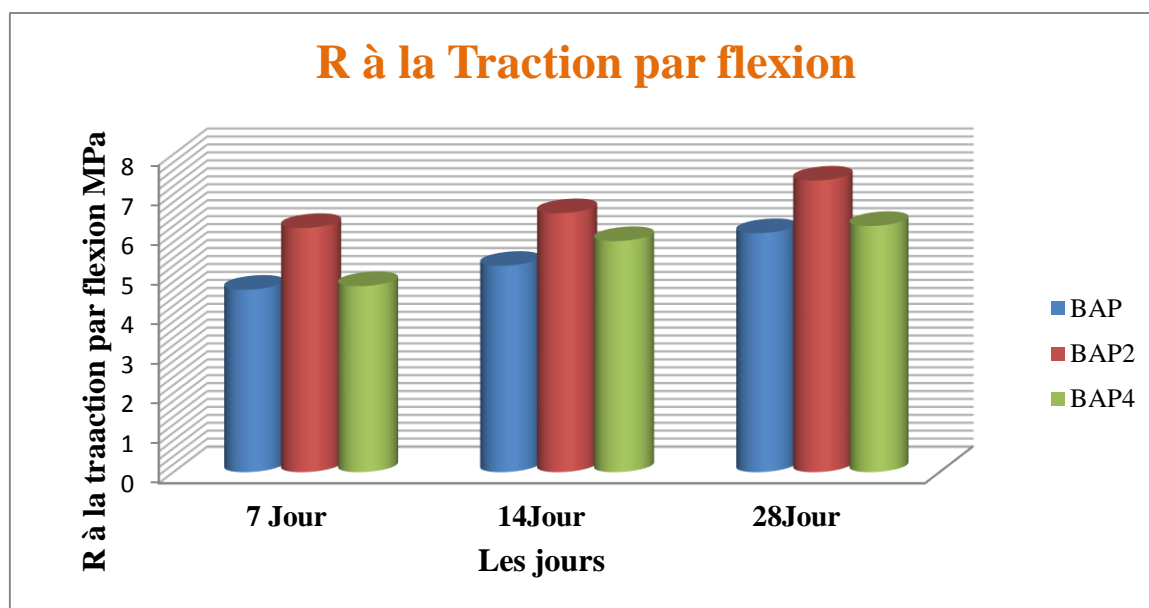


Figure VI -8 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa non traités longues et courtes (pourcentage de 0.15%)

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres Alfa non traités courtes (1cm) et longues (2.5cm) avec un pourcentage de 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

D'après les résultats inscrites dans le tableau et les figures ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 12.84% dans la formulation contenant des fibres Alfa non traités courtes, et de 5.29% pour celle qui contient des fibres longues.

Concernant la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de 21.93% pour la formulation qui contient des fibres Alfa non traité courtes, et de 2.99% pour celle qui contient des fibres longues.

Alors la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes mieux qu'à fibres longues.

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa traités (pourcentage de 0.1%) :**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression (MPa)			R a la traction par flexion (MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAPT1	34,26	36.09	39,54	6.78	6.80	7.64
BAPT3	31,5	34,38	36.13	6.02	6.52	6.82

Tableau VI-6: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités longues et courtes) : pourcentage de 0.1%

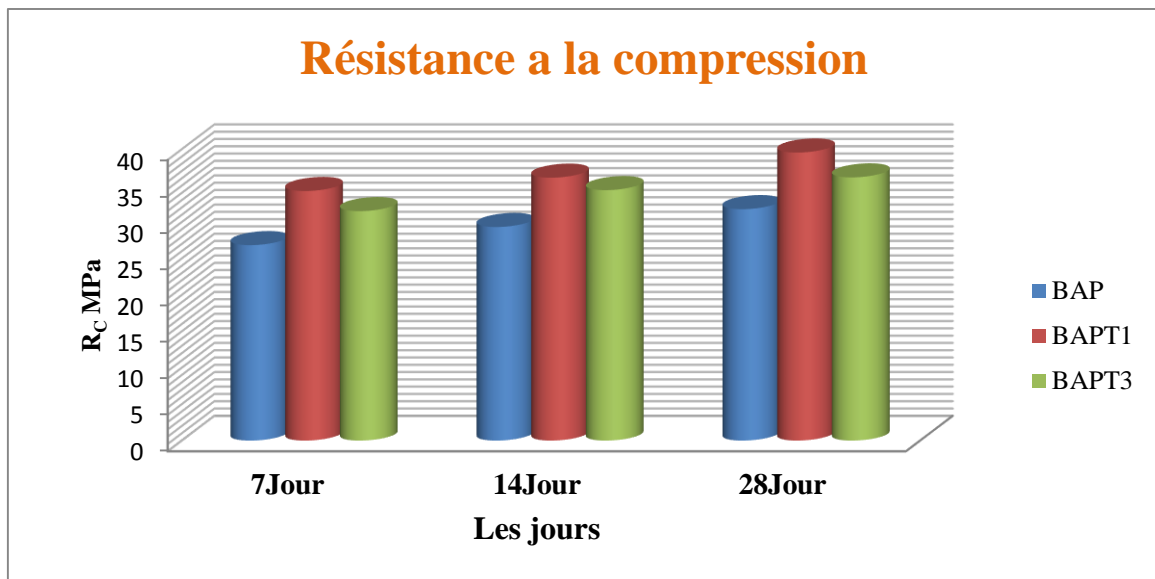


Figure VI -9 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.1%)

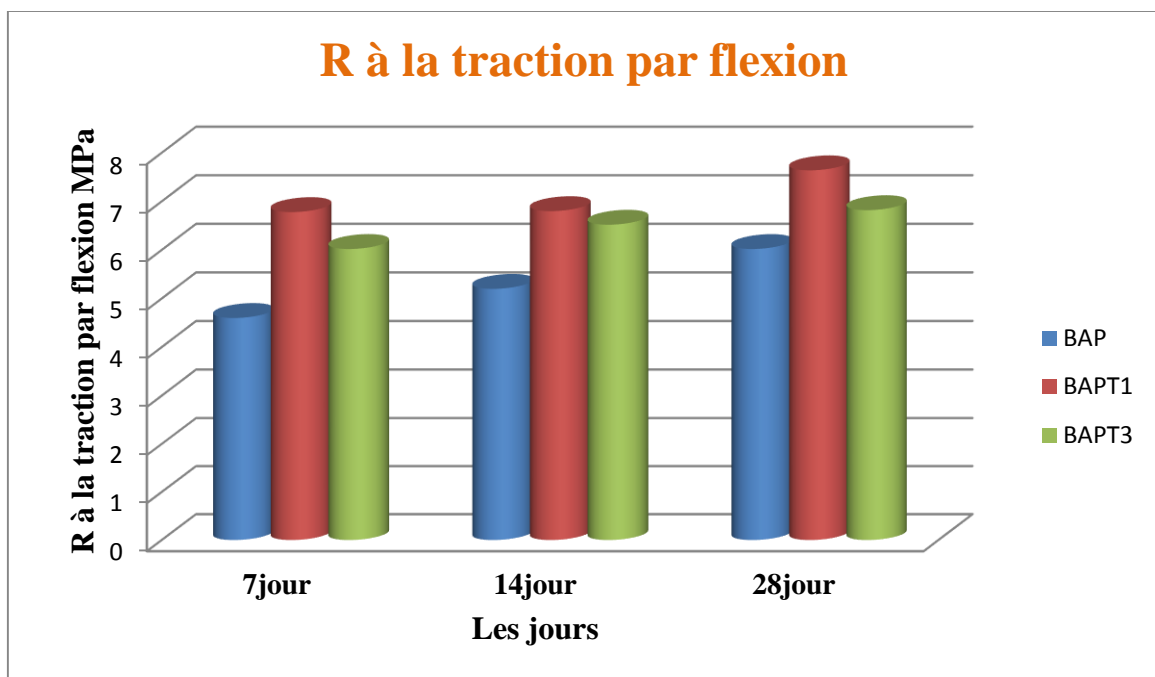


Figure VI -10 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.1%)

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres Alfa traitées courtes (1cm) et longues (2.5cm) avec un pourcentage de 0.1% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

D'après les résultats inscrites dans le tableau et les figures ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 24.46% dans la formulation contenant des fibres Alfa traité courtes, et de 13.72% pour celle qui contient des fibres longues.

Concernant la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de 29.91% pour la formulation qui contient des fibres Alfa traités courtes, et de 13.29% pour celle qui contient des fibres longues.

Donc les dimensions des fibres traités jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants mais la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes mieux qu'à fibres longues.

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa traités (pourcentage de 0.15%) :**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAPT2	33,69	35,45	38,84	6.20	6.60	7.43
BAPT4	31,04	33,30	35,36	5.2	6.06	6.40

Tableau VI-7 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités longues et courtes) : pourcentage de 0.15%

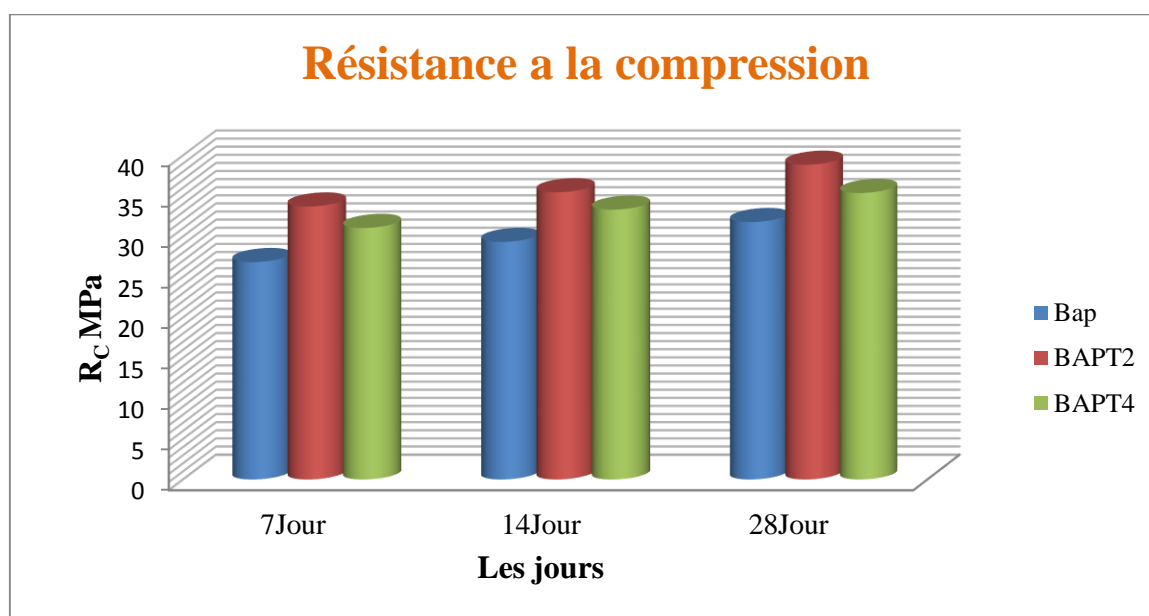


Figure VI -11 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.15%)

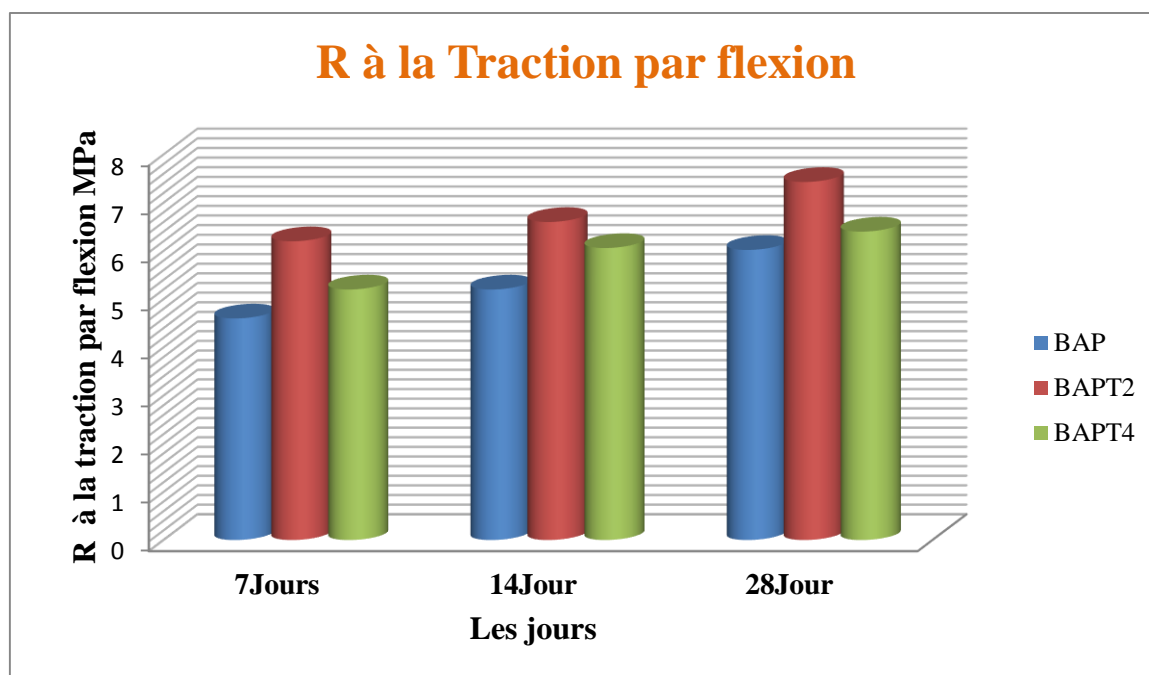


Figure VI -12 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur de fibres Alfa traitées longues et courtes (pourcentage de 0.15%)

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par de fibres Alfa traités courtes (1cm) et longues (2.5cm) avec un pourcentage de 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

D'après les résultats inscrites dans le tableau et les figures ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 22.25% dans la formulation contenant des fibres Alfa traités courtes, et de 11.30% pour celle qui contient des fibres longues.

Concernant la résistance à la flexion il y'a une légère augmentation de résistance de l'ordre de 23.42% pour la formulation qui contient des fibres Alfa traités courtes, et de 6.31% pour celle qui contient des fibres longues, donc les dimensions des fibres traités jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants mais la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes mieux qu'à fibres longues.

VI.3.2. Influence de pourcentage de fibres :

Les résultats sont représentés sur les tableaux suivants :

❖ Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa non traités longues (pourcentage de 0.1%,0.15%) :

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP3	29,32	31,68	34,90	5.8	6.2	6.61
BAP4	28,78	30,99	33.45	4.69	5.82	6.2

Tableau VI -8: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités longues) : pourcentage de 0.1%et 0.15%

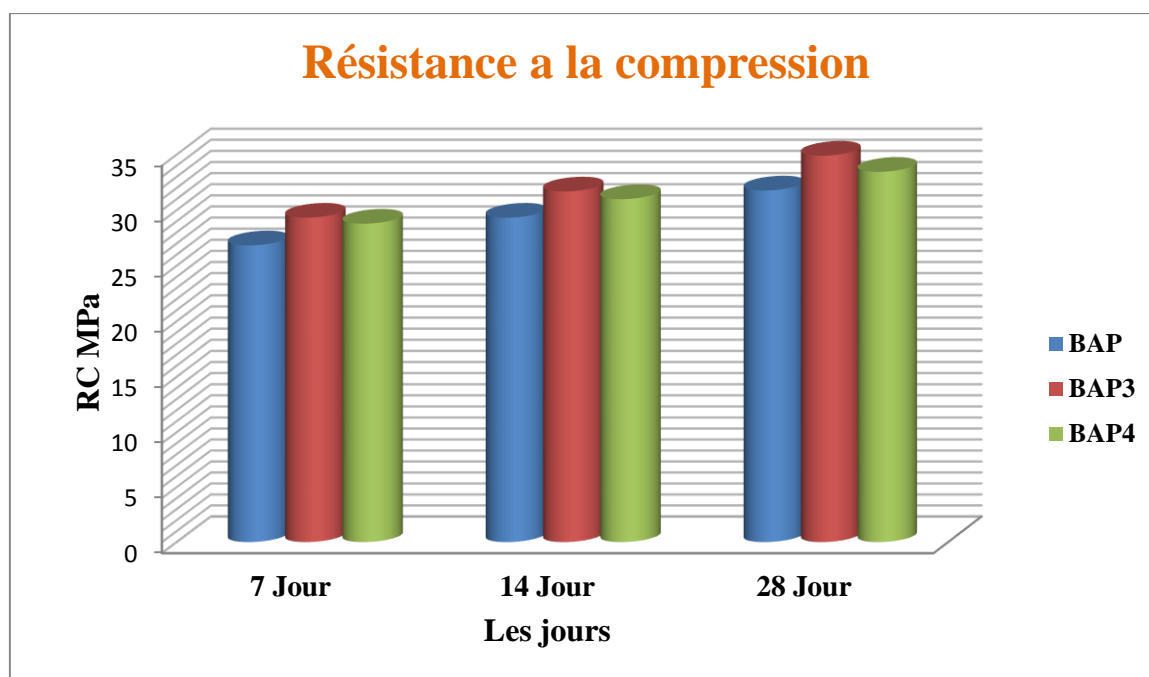


Figure VI -13 : Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités longues

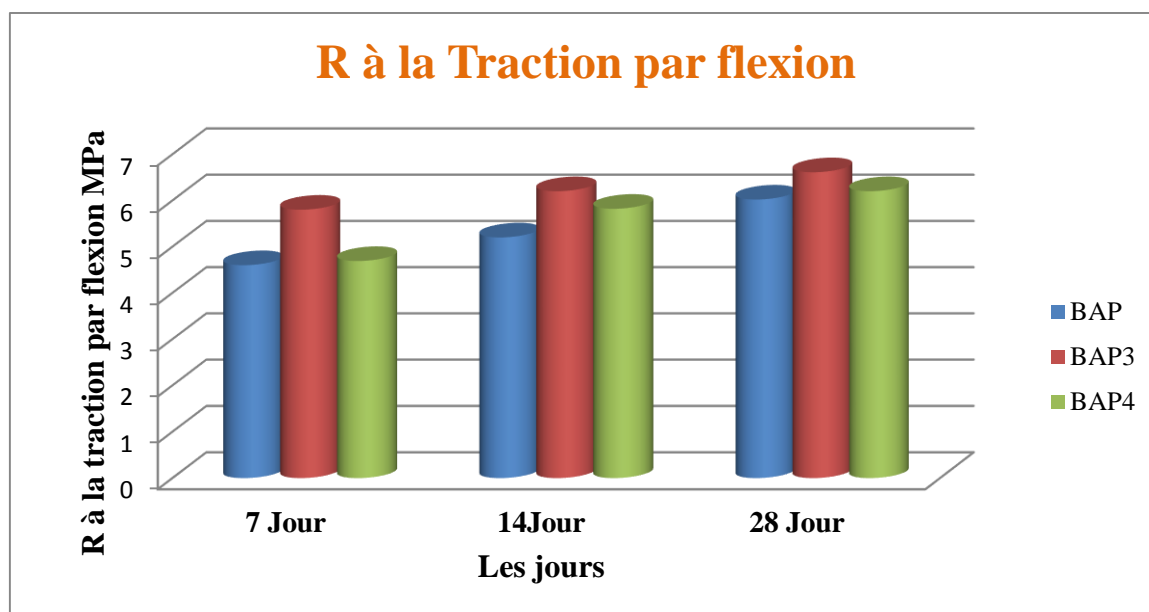


Figure VI -14 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités longues

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres de verre longue (2.5cm) avec différents pourcentages de 0.1% et 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

Nous remarquons d'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus que l'utilisation d'une fibre Alfa non traités longue améliore les propriétés mécaniques du béton autoplaçant ou nous avons trouvé dans le cas de pourcentage 0.1% une différence de 9.85% pour la résistance à la compression et une valeur de 9.80% pour la résistance à la flexion.

Et dans le cas de pourcentage 0.15% l'augmentation de la résistance à la compression est de 5.29 % et la résistance à la flexion est de 2.99% par rapport au béton témoin.

Nous ne concluons que le pourcentage à une influence sur les propriétés mécaniques du béton autoplaçant mais la performance du béton autoplaçant avec pourcentage 0.1% mieux qu'à un pourcentage 0.15% surtout dans le cas de la résistance à la traction par flexion.

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa non traités courtes (pourcentage de 0.1%,0.15%):**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP1	30,48	32.58	37.96	6.16	6.61	7.43
BAP2	29,63	31,87	35.85	6.15	6.52	7.34

Tableau VI -9 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités courtes) : pourcentage de 0.1%et 0.15%

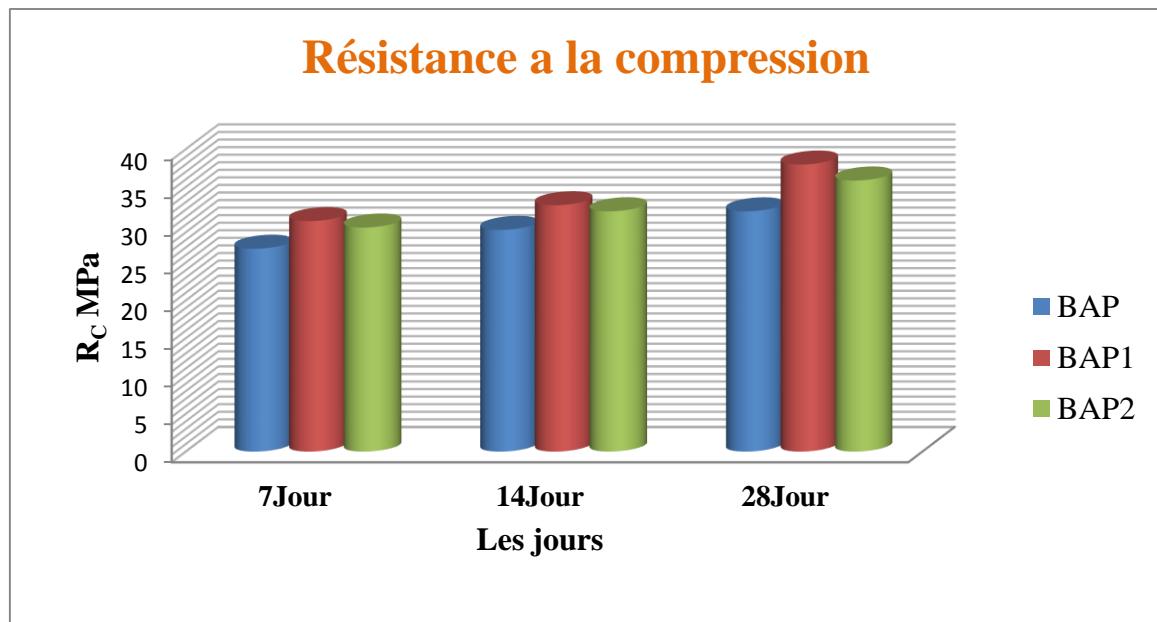


Figure VI -15: Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités courtes.

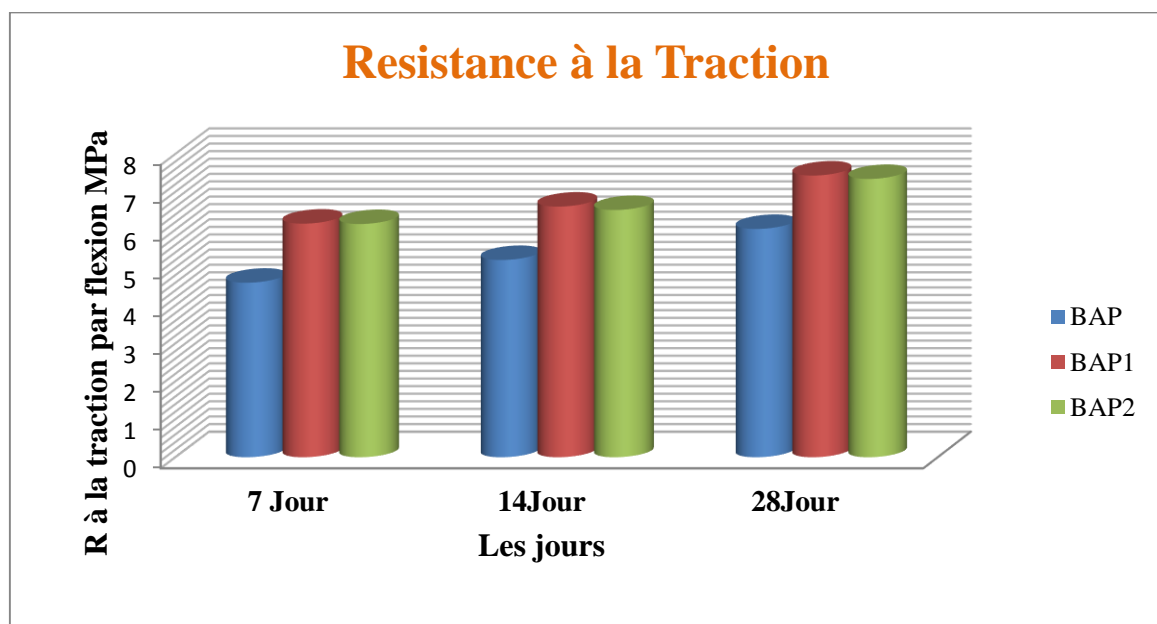


Figure VI -16: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa non traités courtes

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres Alfa non traités courtes (1cm) avec différents pourcentages de 0.1% et 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

Nous remarquons d'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus que l'utilisation de la fibre végétale non traitée courte améliore les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant ou nous avons trouvé dans le cas de pourcentage 0.1% une différence de 19.48% pour la résistance à la compression et une valeur de 23.42% pour la résistance à la flexion.

Et dans le cas de pourcentage 0.15% l'augmentation de la résistance à la compression est de 12.84% et la résistance à la flexion est de 21.93% par rapport au béton témoin.

Nous ne concluons que le pourcentage 0.1% mieux que le pourcentage 0.15%

❖ Béton autoplçant renforcé de fibres Alfa traitées longues (pourcentage de 0.1%,0.15%) :

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAPT3	31,50	34,38	36,13	6.02	6.52	6.82
BAPT4	31,04	33,30	35,36	5.2	6.06	6.40

Tableau VI -10 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplçants fibrés (fibres Alfa traités longues) : pourcentage de 0.1%et 0.15%

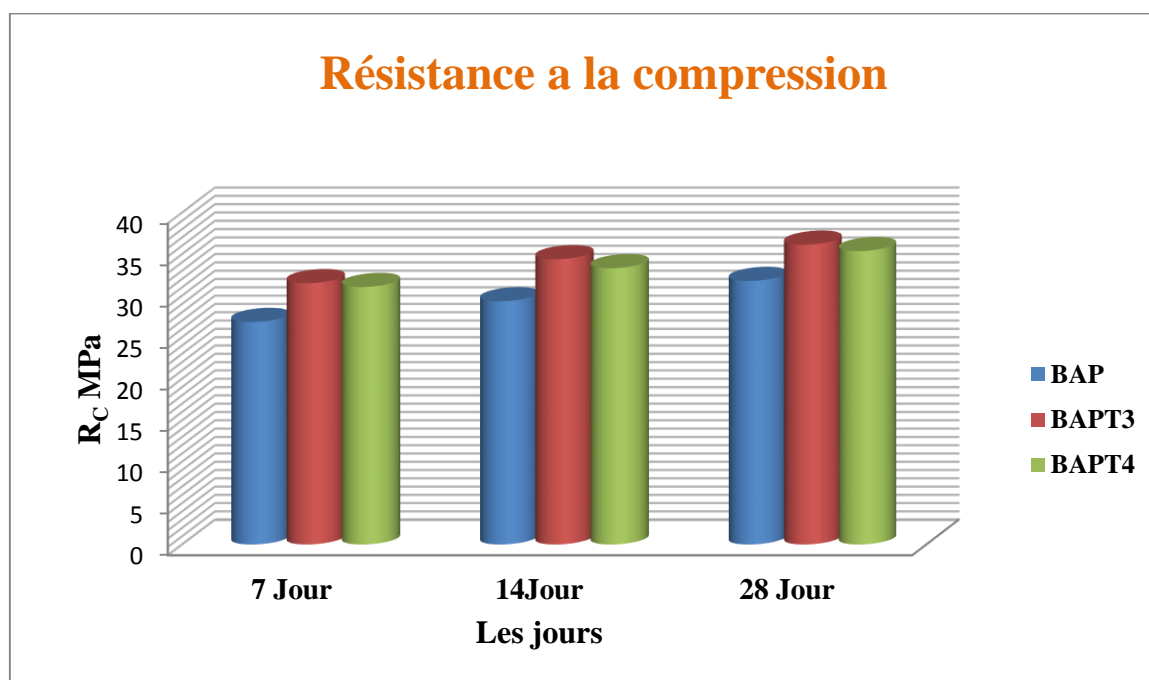


Figure VI -17 : Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités longues

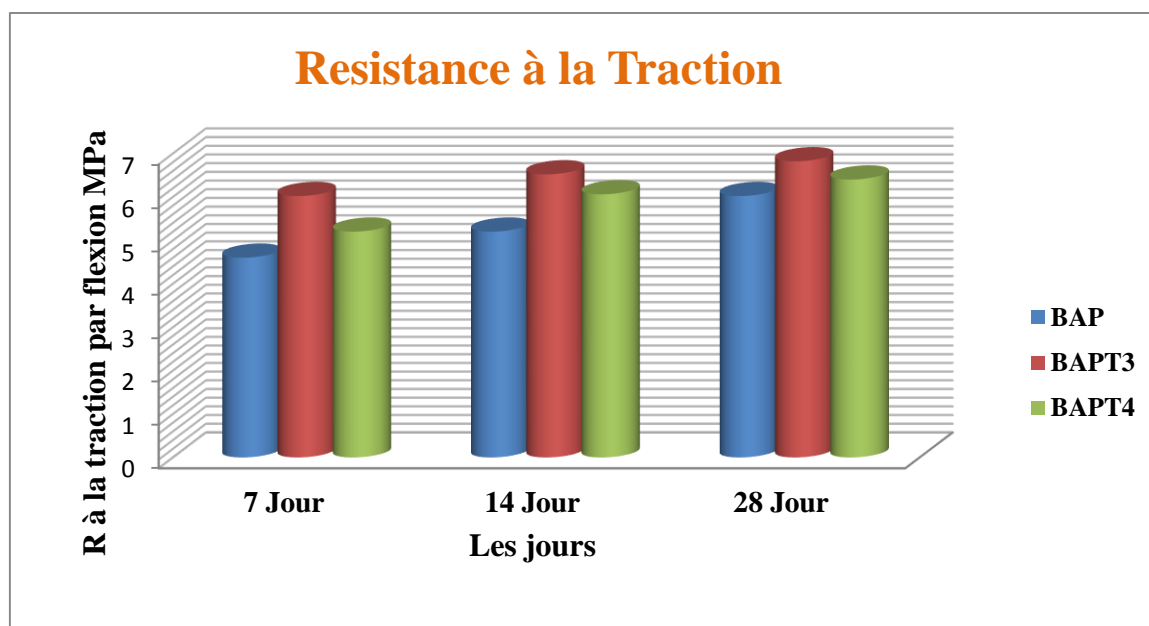


Figure VI -18: Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités longue

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres Alfa traités longues (2.5cm) avec différents pourcentages de 0.1% et 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

Nous remarquons d'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus que l'utilisation d'une fibre Alfa traités longue améliore les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant ou nous avons trouvé dans le cas de pourcentage 0.1% une différence de 13.72% pour la résistance à la compression et une valeur de 13.29% pour la résistance à la flexion.

Et dans le cas de pourcentage 0.15% l'augmentation de la résistance à la compression est de 11.30% et la résistance à la flexion est de 6.31% par rapport au béton témoin.

Nous ne concluons que le pourcentage influencé sur les propriétés mécaniques du béton autoplaçant mais la performance du béton autoplaçant avec pourcentage 0.1% mieux qu'à un pourcentage 0.15% surtout dans le cas de la résistance à la traction par flexion.

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa traités courtes (pourcentage de 0.1%,0.15%):**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAPT1	34,26	36.09	39.54	6.78	6.80	7.64
BAPT2	33,69	35.45	38.84	6.20	6.60	7.43

Tableau VI -11 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités courtes) : pourcentage de 0.1%et 0.15%

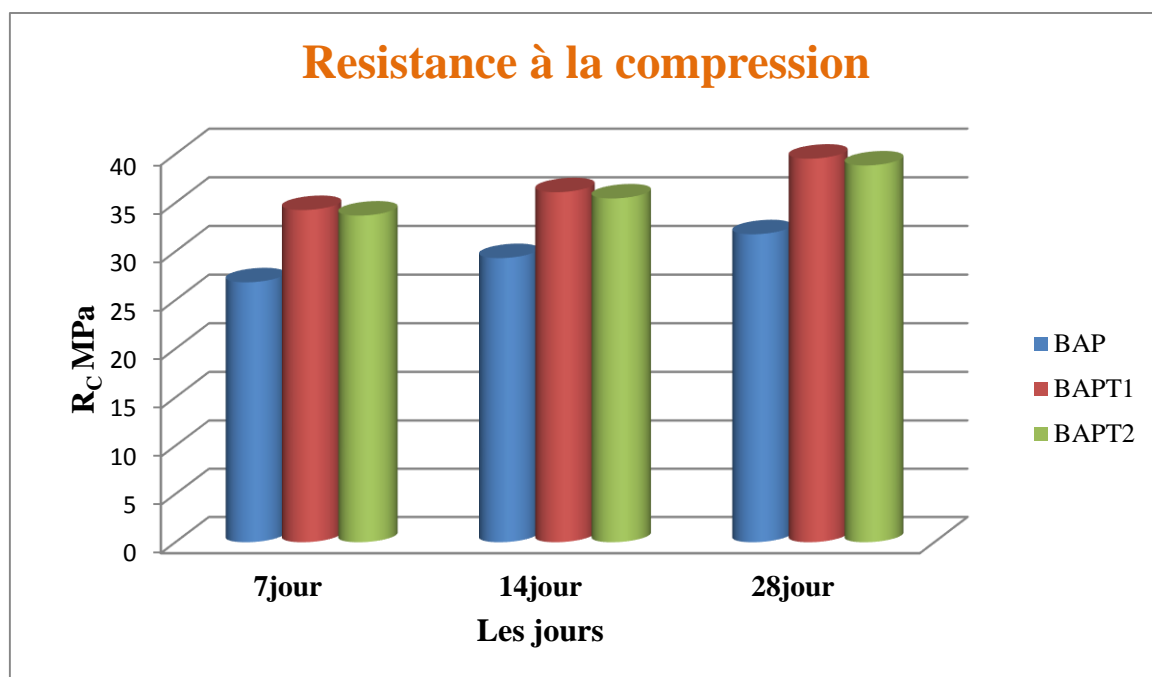


Figure VI -19: Variation de la résistance à la compression en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités courtes

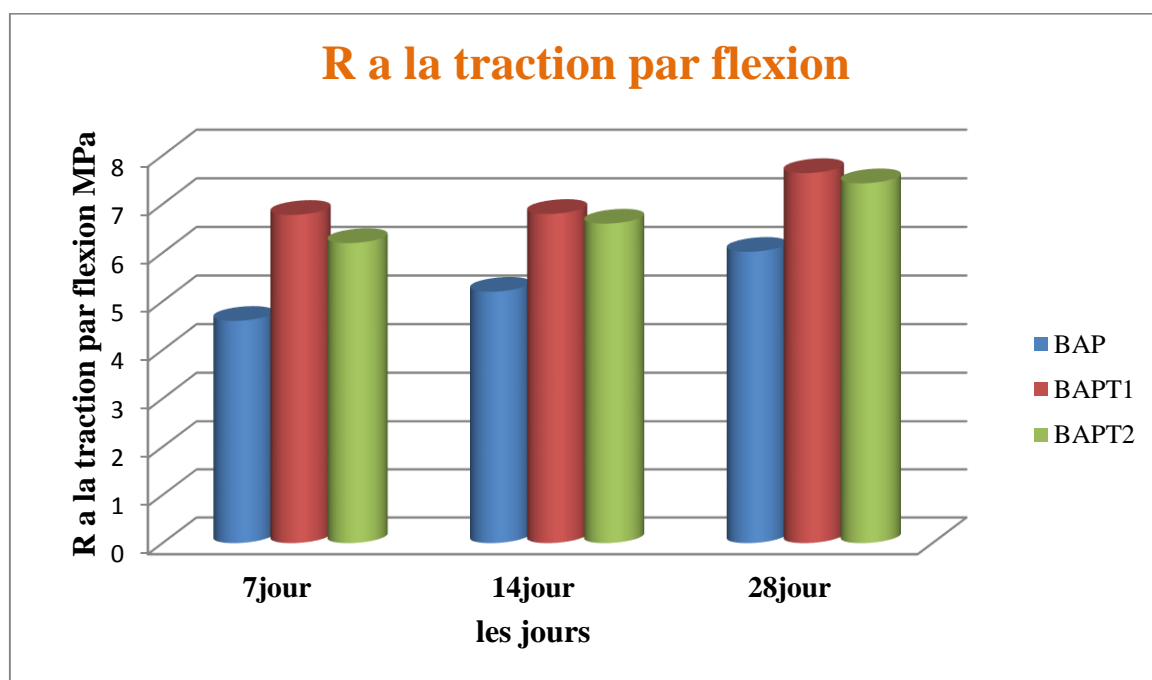


Figure VI -20 : Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages (0.1% et 0.15%) de fibres Alfa traités courtes

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres Alfa traités courtes (1cm) avec différents pourcentages de 0.1% et 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

Nous remarquons d'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus que l'utilisation d'une fibre Alfa traités courte améliore les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant ou

nous avons trouvé dans le cas de pourcentage 0.1% une différence de 24.46% pour la résistance à la compression et une valeur de 26.91% pour la résistance à la flexion.

Et dans le cas de pourcentage 0.15% l'augmentation de la résistance à la compression est de 22.25% et la résistance à la flexion est de 23.42% par rapport au béton témoin.

VI.3.3. Influence de la nature de fibres:

❖ **Béton autoplaçant renforcé de fibres longues Alfa non traités et Alfa traités de (pourcentage de 0.1%) :**

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP3	29.32	31.68	34.90	5.8	6.2	6.61
BAPT3	31.5	34.38	36.13	6.02	6.52	6.82

Tableau VI -12 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa traités et non traités longues)

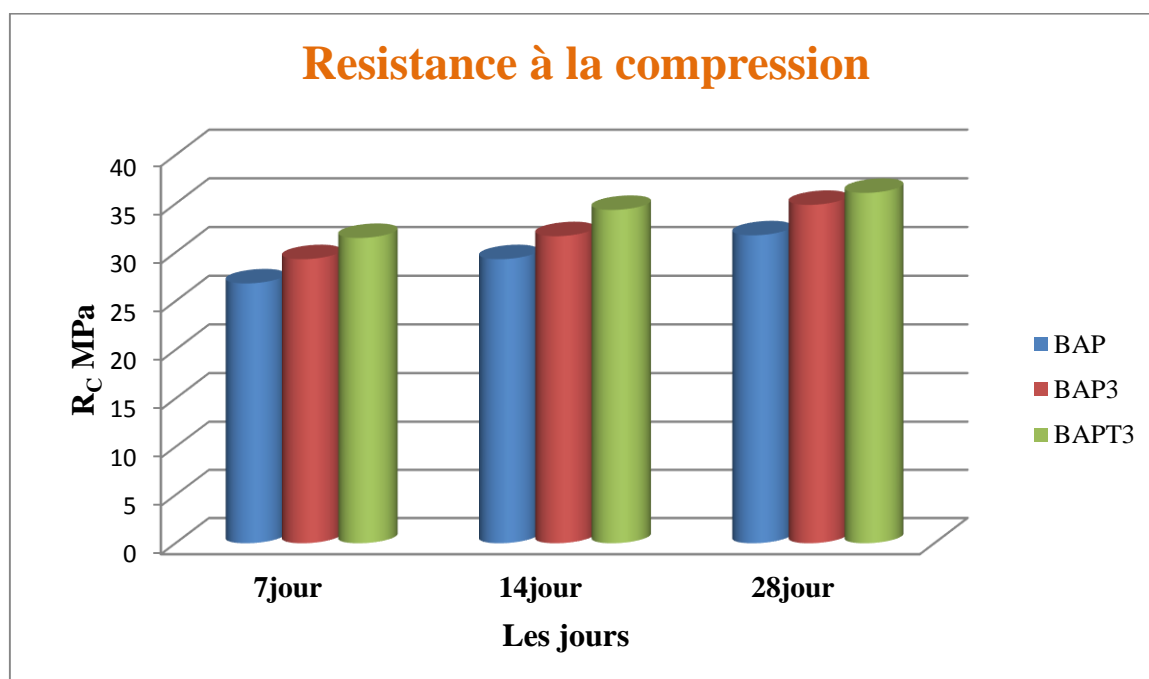


Figure VI -21 : Influence de la nature de fibres longues sur la résistance à la compression du béton autoplaçant

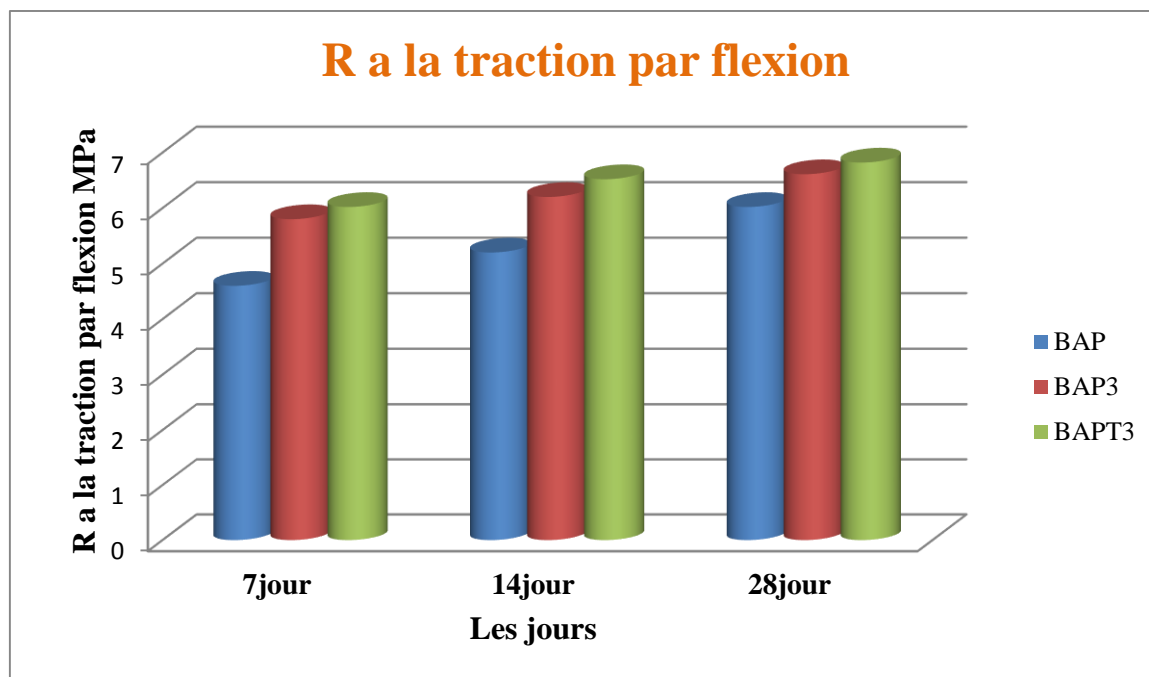


Figure VI -22 : Influence de la nature de fibres longues sur la résistance à la traction par flexion du béton autoplaçant

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et BAP fibré par des fibres Alfa non traités longue (2.5cm) et des fibres Alfa traités longue (2.5cm) avec pourcentages de 0.1% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

La résistance à la compression :

D'après les résultats inscrits dans le tableau ci-dessus on remarque que l'ajout de fibres Alfa non traités nous remarquons qu'on a un accroissement de résistance de 9.85%, et pour les fibres Alfa traités longues on a un accroissement de résistance de 13.72%

La résistance à la flexion :

L'ajout de fibres au béton influe positivement sur sa résistance à la flexion où nous remarquons d'après les résultats obtenus que les fibres améliorent la résistance de BAP par 13.29% pour les fibres Alfa traités longues et de 9.80% pour les fibres traités longues

Alors on peut conclure que la performance du béton autoplaçant avec les fibres Alfa traités longues mieux qu'un béton avec les fibres Alfa non traités longues.

❖ Béton autoplaçant renforcé de fibres Alfa non traités et traités courtes (pourcentage de 0.15%) :

	Caractéristiques					
	Résistance a la compression(MPa)			R a la traction par flexion(MPa)		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
BAP	26,83	29.32	31.77	4.60	5.2	6.02
BAP2	29,63	31,87	35.85	6.15	6.52	7.34
BAPT2	33,69	35.45	38.84	6.20	6.60	7.43

Tableau VI -13: Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres Alfa non traités et traités courtes)

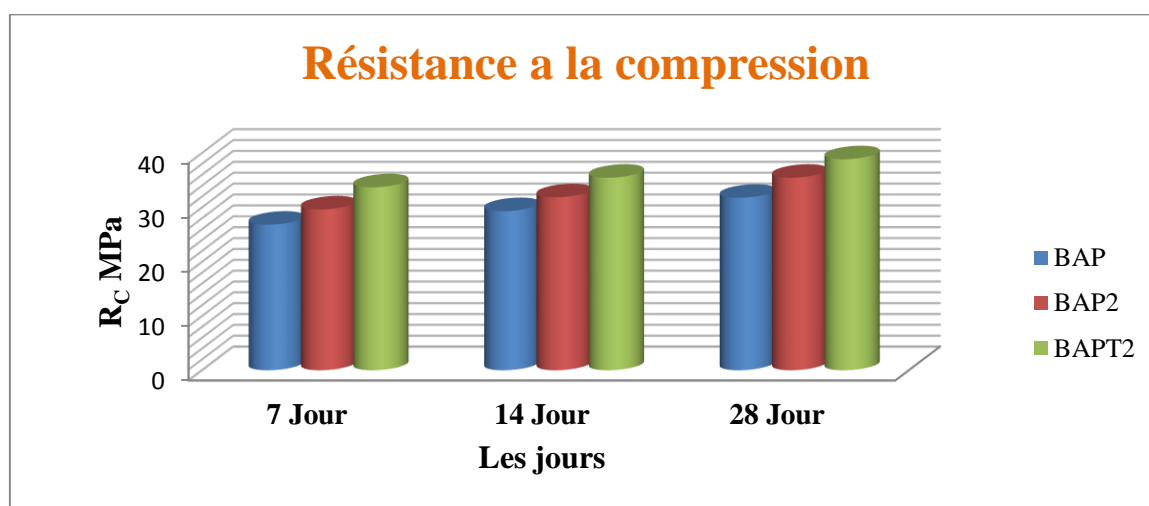


Figure VI -23: Influence de la nature de fibres courtes sur la résistance à la compression du béton autoplaçant

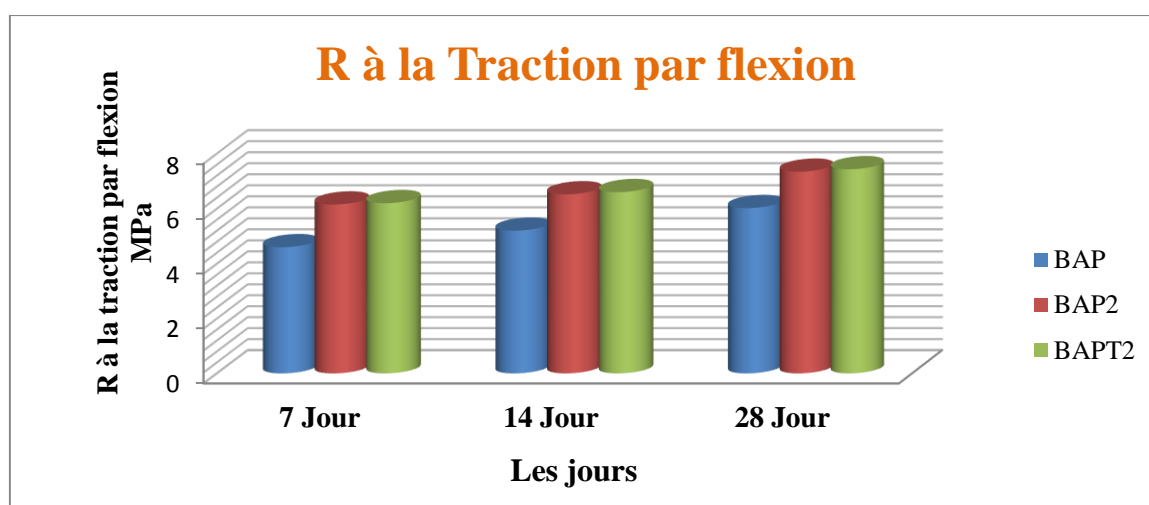


Figure VI -24: Influence de la nature de fibres courtes sur la résistance à la traction par flexion du béton autoplaçant

Le tableau et les figures ci-dessus présentent les caractéristiques mécaniques d'un BAP témoin et BAP fibré par des fibres Alfa non traités courte (1cm) et des fibres Alfa traitées courte avec pourcentages de 0.15% en volume pour la formulation du béton autoplaçant.

La résistance à la compression :

D'après les résultats inscrits dans le tableau ci-dessus on remarque que l'ajout de fibres Alfa traitées nous remarquons qu'on a un accroissement de résistance de 22.25%, et pour les fibres Alfa non traités courte on a un accroissement de résistance de 12.84%

La résistance à la flexion :

L'ajout de fibres au béton influe positivement sur sa résistance à la flexion où nous remarquons d'après les résultats obtenus que les fibres améliorent la résistance de BAP par 6.42% pour les fibres Alfa traitées courtes et de 3.77% pour les fibres Alfa non traités courte.

Alors on peut conclure que la performance du béton autoplaçant avec les fibres Alfa traitées courte mieux qu'un béton avec les fibres Alfa non traités courte.

VI.3.4. Module d'élasticité :

Les résultats sont représentés sur les tableaux suivants :

Type de béton	BAP	BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAPT1	BAPT2	BAPT3	BAPT4
Module d'élasticité	34439,6	36523,3	35840,5	35524,3	35030 ,3	37018,1	36800,6	35932,6	35678,1

Tableau VI-14 : Résultats du module d'élasticité

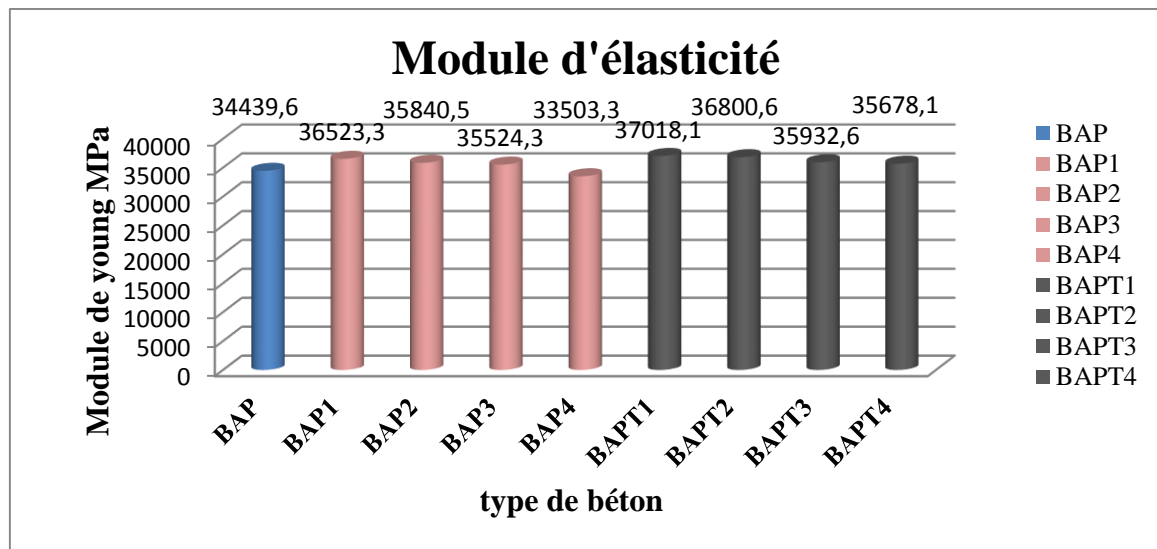


Figure VI -25: Le Module de Young en fonction des BAP.

Quelle que soit la nature de fibre et différents types des BAP fibré ou non, le module d'élasticité change avec la résistance à la compression de 28 jours f_{c28}

VI.4. Conclusion :

Le cinquième chapitre est consacré aux résultats et analyses obtenus lors de cette étude ainsi que les intérêts techniques d'un BAP et BAP fibré.

L'objectif de notre travail consiste à réaliser un béton autoplaçant fibré par l'ajout des fibres Alfa traités et non traités avec des différentes dimensions et pourcentages afin de voir l'influence de traitement chimique et les dimensions et les pourcentages de ces fibres sur les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci et faire une comparaison avec un béton autoplaçant sans fibre.

D'après les résultats obtenus on constate que :

L'utilisation des fibres Alfa dans les mélanges du béton autoplaçant à affecter l'étalement ainsi que le taux de remplissage.

La composition des bétons autoplaçant donne une grande fluidité sans ségrégation mais il y'a toujours problème dans taux de remplissage parce que le phénomène de blocage des fibres apparait dans le BAP fibrés. Cela est causé par la géométrie de la fibre notamment sa longueur.

Les dimensions de fibres Alfa jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques du béton autoplaçant mais la performance du béton autoplaçant avec les fibres courtes est mieux que le béton avec fibres longues.

Pour l'influence du pourcentage de fibres et d'après les résultats obtenus, on observe que l'augmentation du dosage de fibre du béton est accompagnée d'une diminution du taux de

remplissage, par contre les fibres n'influe pas sur la stabilité au tamis. L'utilisation des fibres influe positivement sur cette dernière et on a une augmentation de la résistance à la compression et à la traction.

La performance du béton autoplaçant avec les fibres Alfa 0.1% se comporte mieux que le BAP avec 0.15%.

Le traitement par NaOH entraine une modification des propriétés mécaniques, nous montrons qu'un traitement avec NaOH permet d'améliorer la résistance en flexion des compositions par l'amélioration de l'adhésion à l'interface.

A titre de comparaison, les fibres Alfa traitées peuvent être utilisée comme renfort pour le béton autoplaçant, les résultats des tests en propriété mécanique sur les éprouvettes montrent clairement que le béton autoplaçant avec fibres traités se comporte mieux que le béton autoplaçant avec les fibres non traités

Conclusion général :

Conclusion générale :

L'utilisation des fibres synthétique (fibres de verre) comme renforts dans un béton autoplaçant à des impacts sur l'environnement et la vie de l'homme. Dans ce cas, nous avons choisi des fibres végétales pour réduire ces problèmes, grâce à leur comportement écologique.

D'après les résultats des tests sur les différentes éprouvettes en bétons autoplaçants renforcés par fibres végétales (Alfa) ou fibre de verre à titre de comparaison de façon aléatoire, on peut dire que le traitement alcalin (NaOH) rend les fibres plus raides et conduit à des changements important dans la morphologie de la surface des fibres végétales. De plus, le traitement assure une bonne adhérence entre les fibres et la matrice autoplaçant. L'ajout de ces fibres végétales a un effet significatif sur le comportement du matériau renforcé.

L'analyse des résultats des essais réalisés à « la boîte en L », nous a permis de distinguer un écoulement continu du BAP témoin et aucun signe de blocage de granulats n'est observé, néanmoins on relève que l'addition des fibres au BAP a influencé son ouvrabilité, le phénomène de blocage des fibres apparait dans le BAP fibrés. Cela est causé par la géométrie de la fibre notamment sa longueur malgré que cette longueur soit inférieure à l'espacement entre les armatures, nous notons que l'espacement entre les armatures est de « 34 mm ».

Les bétons autoplaçants sans fibres présentent des dégradations et des fissures remarquables, tandis que les fibres d'Alfa ont contribué à minimisé les fissurations du BAP, ainsi que la largeur des fissures a aussi diminuée.

L'incorporation des fibres d'Alfa dans le BAP a permis d'augmenter sa résistance à la flexion d'environ 13.72 % (Alfa traités) et d'environ 9.80% par rapport à un BAP témoin, et d'avoir un gain de plasticité, retarder la fissuration, diminuer la largeur des fissures et d'éviter une ruine brutale des éprouvettes. Une ductilité dans le composite BAP avec Alfa se produit principalement par un pontage des fissures par les fibres.

L'optique d'utiliser des déchets végétaux dans le domaine du Génie Civil nous a permis de contribuer d'une manière assez humble à la valorisation de ces matériaux naturels. L'addition de fibres d'Alfa dans le BAP modifie complètement le comportement du béton et amélioré considérablement les caractéristiques mécaniques du matériau. Les résultats expérimentaux présentent une efficacité des fibres pour les sollicitations à la flexion, une grande amélioration de la résistance à la flexion, ainsi qu'à la résistance à la fissuration : un changement d'une fissuration fragile du BAP à une fissuration ductile a été distingué. Malgré la dégradation de la maniabilité du béton il a présumé ses caractéristiques autoplaçant.

Le gain de résistance est plus important pour le BAP avec Alfa traité, Cela peut être expliqué par la mauvaise adhésion entre la fibre non traitée et matrice, alors le traitement assure une bonne adhérence entre les fibres et la matrice.

Conclusion général :

La différence de résistance en compression entre le BAP avec Alfa traité et non traité, peut être expliquée par le fait que l'introduction des fibres d'Alfa non traité perturbe la compacité du matériau et entraîne la formation d'une porosité supplémentaire, notamment à l'interface fibre – matrice cimentaire, ce problème ne se pose pas avec les fibres d'Alfa traité.

Les résultats montrent que le traitement chimique conduit à des améliorations de la résistance en flexion et de la résistance à la compression. Cette amélioration de la résistance à la compression sont de 24.46 %, 22.25 % (cas du Alfa traité) et respectivement comparés à celles du béton autoplaçant non renforcé. Comparés à celles du béton autoplaçant renforcé par fibres non traitées, ces améliorations sont de l'ordre de %, % respectivement. au cas de flexion, le béton autoplaçant renforcé par les fibres d'Alfa traitées résiste mieux à la propagation de fissure comparé à celui renforcé par des fibres non traitées de l'ordre de %. Cette différence peut être expliquée par la nature des fibres d'Alfa traitée.

Les propriétés des BAP ne sont pas influencer par la longueur le dosage et le traitement des fibres seulement mais avec d'autres facteurs comme les granulats, le ciment et les fillers.

Perspectives :

Karl Jaspers disait : « Faire de la philosophie, c'est être en route, des questions en philosophie sont plus essentielles que les réponses, et chaque réponse une nouvelle question » : à travers cette étude, nous avons montré comment les fibres végétales (fibre d'Alfa) peuvent améliorer le comportement de BAP. Des essais supplémentaires les BAP des fibres végétales (fibre d'Alfa) seraient utiles pour mieux étayer nos premières conclusions.

Les dosages et les dimensions des fibres utilisés dans cette étude n'ont pas conduit à des caractéristiques rhéologiques des BAP qui ne sont pas conformes à la réglementation, il serait nécessaire d'élargir l'étude à des longueurs plus longues et des dosages plus grands. Comme on propose de faire le traitement d'Alfa avec des dosages de NaOH plus élevés (ex : 7%)

Enfin, il serait utile de réaliser des essais de durabilité sur le BAP fibré par la fibre Alfa afin d'étudier ses propriétés physico-chimiques.

Les références bibliographiques

- [1]- Haddad O., 1^{er} congrès international sur la technologie et la durabilité du béton à Alger, les 24,25 et 26 Mai 2004.
- [2]- Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « *Formulation et caractérisation des bétons autoplacant* », Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger, le 06 Juillet 2006.
- [3]- Association Française de Génie Civil « *AFGC* », Bétons autoplacants Recommandations provisoires, Juillet 2002, 63 pages.
- [4]- Seddik A, Thèse de magistère en Génie Civil, « *le béton autoplacant sous conditions locales* », Département de Génie Civil, Université de Sétif (Algérie), Février 2008.
- [5]- Benkachache Ghofrane, « *Etude de comportement diffère des Bétons Autoplacants Influence des paramètres de composition et de chargement* », Thèse de Magister Novembre 2007, Université Mentouri Constantine, Novembre 2007.
- [6]- AFGC, « *Bétons Autoplacants - Recommandations Provisoires* ». Documents Scientifiques et Technique, Page 63, 2000.
- [7]- Hanaa Fares, « *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons Autoplacants exposés à une Température élevée* », Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise Décembre 2009,
- [8]- Okamura.H, Ozawa.K and Ouchi.M, self-compacting concrète, Structural Concrete, Marsh -2000.
- [9]- Sedran.T, Rhéologies et Rhéomètre des Bétons. application au Béton Autonivlant, Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées ; 1999.
- [10]- Okamura H., Ouchi M., Self-compacting Concrete, Journal of advanced concrete technology, vol 1, p5-15, 2003.
- [11]- PC. Aitcin, S. Jiang, BG. Kim, PC. Nkinamubanzi, and N. Pétrov. L'interaction ciment : super plastifiant. Cas des polysulfonâtes. Bulletin des Laboratoires des ponts et Chaussées, Vol. 233 : 87-98, Juillet-Aout 2002.
- [12]- Turcy P., Thèse de doctorat en Génie Civi, « *Retrait et fissuration des bétons autoplacant – Influence de la formulation* ». Ecole. Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004.
- [13]- Khélifa R., « *Influence des Ciments à base D'Ajouts Minéraux sur les propriétés Mécaniques des Mortiers et des Béton* », Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine, le 11 Juillet 2001.

Les références bibliographiques

- [14]- « *R.Dupain/ R.Lanchon/ J.C.Saint-Arroman* » Granulats, Sols, Ciments et Bétons Edition 2000.
- [15]- Ozawa K ; Kunishima M ; Maekawa K ; Okamura H. « *Challenge for high performance concrete* ».Proc. Conf. On high performance Concrete, University of Tokyo, p 5-17, Sep 1991.
- [16]- Seridi said mémoire de master en Génie Civil « *Comportement de BAP a haut température* » 2013/2014.
- [17]- Youcef Fritih, Apport d'un renfort de Fibres sur le comportement d'éléments en Béton autoplaçant armé Thèse de Doctorat de L'université de Toulouse ,08 Juillet 2009.
- [18]- Rossi .P, Harrouche, N, Lemaou .F, «*Comportement Mécanique des Bétons de Fibres Métalliques utilisés dans les Structures en Béton Armé et en Béton précontrainte*». Annales de l'itbtp, Série Matériaux 73, n°479 bis, pp. 166-183, Décembre 1989.
- [19]- Boukni Bariza, tenue au Feu des Bétons Autoplaçants, Mémoire de Magister Université Mentouri Constantine, Décembre 2007.
- [20]- M.Bentalha. «*Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone - Microstructure*». Thèse de Doctorat d'état, Université Mentouri-Constantine, Octobre, 2007.
- [21]- Guillaume Camps, Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un Elément de Stockage en Béton, Thèse Doctorat de l'université de Toulouse soutenue le 10 Septembre 2008.
- [22]- Chemrouk, M .Tahenni, T et Boulekbeche.B, «*Béton renforcé en Fibres : un Matériau aux avantages multiples*». 1ère Conférence Internationale sur les Energies, Matériaux et Environnement Cieme'09 Centre Universitaire de Khemis Miliana, 22 et23 Novembre 2009.
- [23]- Rossi. P, Tunnels et Espace Souterrain, Revue Béton[s]- n°218 - pp. 154- 154, Avril 2010.
- [24]- 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).

Les références bibliographiques

- [25]- Rossi .P, Les Bétons de Fibres Métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p. (1998).
- [26]- Belkacemi Cherifa, « *étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renforts en matière végétale* », mémoire magister, université M'Hamed Bouguerra Boumerdes, 2006.
- [27]- Bezato Tsaranofy Zita Fredo, « *les palmiers dattiers : étude de la filière, utilisation et diversité variétale* », mémoire DEA, université de Tolirara, domaine biologie végétales, juillet 2013.
- [28]- Bates.J, « *les fibres naturelles pour les composites* », KU.LEUVEN, octobre 2014.
- [29]- Yahiaoui Lamia, « *caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales Diss* », mémoire magister, option mécanique appliquée, université de Sétif, 2011.
- [30]- Moktari Abdessamed, « *influence des ajouts de fins minérales sur les performances mécaniques des bétons renforcé de fibre végétales de palmier dattier* », université de Kasdi Merbah Ouargla option génie civil, novembre 2006.
- [31]- Mohamed Dallel, « *évaluation du potentiel textile des fibres halfa, caractéristique physico-chimique de la fibre au fil* », thèse doctorat, université de haute Alsace-Mulhouse, France, 2012.
- [32]- CARMA, « *Glossaire des matériaux composites renforcés des fibres d'origine renouvelable* », centre d'animation régional en matériaux avancés, Décembre 2006.
- [33]- Sofien Bouzouita, « *optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel* », thèse doctorat, école centrale de Lyon, France, janvier 2013.
- [34]- Daghefel Azzedine, « *Étude du comportement à la rupture du béton polymère renforcé par des fibres végétales* », mémoire master, université de M'sila, juin 2012.
- [35]- Baali Hafida, « *étude de l'effet du traitement chimique des fibres de palmier dattier sur le comportement mécanique du béton polymère* », mémoire master, université de M'sila, juin 2014.
- [36]- Rachedi Mokhtar, « *contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre base de sable de dune renforcé par des fibres de palmier dattier* », mémoire magister, université Kasdi Merbah, Ouargla, 2013.

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

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 (SiO²) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃). 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 micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) :
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) :
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement, .etc.) ;
- Secteur industriel.

Algerian Cement Company (SPA)

Hamam Dalaï, M'ella (ACC)
Tél: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE
لافارج



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Direction générale

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Hammam Dajaa, M'ella (ACC)
Tél: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tél: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29360, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98

LAFARGE
لافارج

