

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Frères Mentouri  
Faculté des Sciences de la Technologie  
Département de Génie Civil



N° d'ordre : ....

Série : .....

## **Mémoire**

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Magister  
en Génie Civil

Option : Matériaux

Par

**GHARIBI Wahiba**

## **Thème**

**INFLUENCE DES FIBRES VEGETALES SUR LE COMPORTEMENT  
DES BAP SOUS ENVIRONNEMENT AGRESSIF**

### **Devant le jury composé de :**

Président : Pr. N.CHIKH	Université Frères Mentouri-Contantine
Rapporteur : Pr. H. HOUARI	Université Frères Mentouri-Contantine
Examineur : Dr. K.ABDOU	Université Frères Mentouri-Constantine
Examineur : Dr. S.KOULOUGHLI	Université Frères Mentouri-Constantine

**04 Juin 2015**

## REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.

Je remercie tout d'abord le Professeur H. HOUARI de m'avoir proposé ce sujet de mémoire, de l'attention qu'il a portée à mon travail et des moments précieux de discussion qu'il m'a réservés.

Je le remercie infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur N.CHIKH, Professeur au Département de Génie Civil à l'université Frères Mentouri de Constantine, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cet mémoire.

Je tiens également à remercier les membres de jury de soutenance, docteur K.ABDOU, Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'université Frères Mentouri de Constantine, et docteur S.KOULOUGHLI, Maître de Conférences au Département de Génie Civil à l'université Frères Mentouri de Constantine, d'avoir accepté d'examiner le présent mémoire.

Mes remerciements s'adressent également aux Dr. C.AMOURI, Raouf Belkadi, Sara Bensalem pour leurs aides précieuses, du fond du cœur : MERCI

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin et en particulier l'ensemble des enseignants du département de génie civil de Constantine, à ma formation d'études de la graduation et de la post graduation.

# DÉDICACE

*Je dédie le présent travail  
A mes très chers parents  
A mes sœurs et frères  
A l'ensemble de ma famille*

## Résumé

La prise en compte du développement durable dans la construction requiert la création de nouveaux matériaux ou d'optimiser des matériaux existants. L'utilisation des bétons récents dans le domaine des réparations d'ouvrages urbains et souterrains a pratiquement explosé au cours des dernières années. Dans ce domaine la poursuite du développement des connaissances est grandement conditionnée.

Grâce à une grande sensibilisation pour l'environnement, cette dernière décennie a connu une utilisation croissante des fibres naturelles comme renforts dans les matériaux composites pour la fabrication des biomatériaux. L'utilisation des matériaux composites en fibres naturelles (en particulier végétales) qui sont renouvelables, recyclables et durables est une des bonnes réponses dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être et de confort et de réduire les impacts environnementaux.

Le but de cette recherche est d'étudier les avantages et les inconvénients d'introduction des fibres végétales et synthétiques dans des bétons autoplaçants. Plusieurs type de fibres (chanvre, chènevotte, polypropylène), sont incorporés dans la composition des BAP devant obtenir des BAP qualifiés d'autoplaçant selon les recommandations de l'AFGC, afin d'étudier leurs comportements sous différents aspects (différé, sous élévation de température et dans un milieu agressif (attaque sulfatique)).

Notre travail expérimental nous a conduits de conclure que :

- Les performances mécaniques des BAPF diminuent légèrement par rapport au BAP non fibrés supposant des ajustements de l'eau et superplastifiant, mais elle reste toujours dans les fourchettes d'un béton de structures.

- Les fibres végétales réduisent le coefficient d'absorptivité du mélange par rapport au BAP non fibrés avec des valeurs proches.

- Pour les variations dimensionnelles, les fibres végétales limitent ce phénomène sous différents mode de conservation.

- Les BAP fibrés (chanvre, chènevotte) se comportent bien que les BAP de polypropylène et les BAP non fibrés sous une élévation de température.

- Pour la durabilité (attaque sulfatique), les performances mécaniques (résistances résiduelles à la compression et à la traction) des différents mélanges sont diminuées notamment la résistance à la traction par flexion, mais cette diminution varie d'un béton à l'autre, à titre d'exemple les BAP avec le polypropylène et le chanvre donnent des résultats plus bas, mais ils sont restés dans les fourchettes acceptables. Pour les variations dimensionnelles, les bétons autoplaçants sans fibre présentent des dégradations et des fissures remarquables que les bétons fibrés.

Donc on résume que les bétons autoplaçants avec des fibres végétales et synthétiques présentent des résultats acceptables et efficaces dans certaines propriétés, comme le retrait, le comportement sous élévation de la température et dans des milieux agressifs.

Mot-clé : Béton autoplaçant – Formulation - Fibres végétales – Durabilité - Propriétés.

## **Abstract**

The inclusion of sustainable development in construction requires the creation of new materials or optimizing existing materials. The use of recent concrete repairs in the field of urban and underground structures virtually exploded in recent years. In this area the further development of knowledge is greatly conditioned.

Through an awareness for the environment, the past decade has seen increasing use of natural fibers as reinforcements in composite materials for the manufacture of biomaterials. The use of composite materials made of natural fibers (unparticular vegetable) that are renewable, recyclable, and sustainable is one of the correct answers in order to safeguard the health of man, to meet its needs for well-being and comfort and reduce environmental impacts.

The purpose of this research is to study the advantages and disadvantages of introduction of plant and synthetic fibers in self compacting concrete. Several types of fibers (hemp, boon, polypropylene), are incorporated in the composition of SCC to get qualified for self-compacting as recommended by the AFGC, to study their behavior under different aspects (delayed, under temperature rise, and in an aggressive environment).

Our experimental work has led us to conclude that:

- The mechanical performance of SCCF decreased slightly compared to non bundles SCC assuming water adjustments and superplasticizer, but still within the ranges of concrete structures.
- Vegetable fibers reduce the coefficient absorbency of the mixture from the non bundles with values close SCC.
- For dimensional variations, plant fibers limit the phenomenon in different conservation mode.
- Bundles BAP (hemp, boon) behave well as polypropylene and SCC non bundles under a temperature rise.
- For durability, the drying-wetting cycle is very effective to accelerate the aging of the samples of concrete, the mechanical performance (residual compressive strength and tensile strength) of the various mixtures are reduced mainly by the bending tensile strength, but this decrease varies from one to another concrete, For example SCC with polypropylene and hemp give lower results, but they remained within the acceptable ranges

So we summarize the self-compacting concrete with vegetable and synthetic fibers exhibit acceptable and effective results in certain properties, such as with drawal, behavior under elevated temperature and in aggressive environments.

Keyword: self-compacting concrete-Formulation -Natural fibers- Durability - Properties.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
DÉDICACE.....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1

### CHAPITRE I: CONCEPT ET FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS

I.1.	Introduction.....	7
I.2.	Constituants des Bétons autoplaçants .....	7
I.2.1.	Le Ciment .....	7
I.2.2.	Les granulats .....	7
I.2.3.	Les fines minérales .....	8
I.2.4.	Les superplastifiants.....	8
I.2.5.	Les Agents de viscosité.....	10
I.3.	Essais de caractérisation des BAP à l'état frais.....	11
I.3.1.	Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	11
I.3.2.	Essai de la boîte en L.....	12
I.3.3.	Essai de l'entonnoir en forme de V « V-Funnel ».....	13
I.3.4.	Essai de stabilité au tamis.....	14
I.3.5.	Essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	14
I.4.	Méthodes de formulation des BAP.....	15
I.4.1.	Méthode basée sur l'optimisation des mortiers.....	15
I.4.2.	Méthode basée sur l'optimisation de la pâte.....	16
I.4.3.	Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire .....	16
I.5.	Conclusion.....	17

## TABLE DES MATIÈRES

### CHAPITRE II. LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

II.1.	II.1. Introduction.....	19
II.2.	II.2. Les fibres .....	19
II.3.	Les différents types de fibres.....	19
II.3.1.	Les fibres métalliques .....	20
II.3.2.	Les fibres de fonte amorphe.....	20
II.3.3.	Les fibres de verre.....	21
II.3.4.	Les fibres de polypropylène.....	21
II.3.5.	Les fibres végétales.....	22
II.3.5.1.	Origine des fibres végétales.....	23
II.3.5.2.	Type des fibres végétales.....	23
II.3.5.3.	Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	27
II.3.5.4.	Caractéristiques chimiques des fibres végétales.....	28
II.3.5.5.	Critère de choix du type de fibres.....	29
II.3.5.6.	Matrice cimentaire et fibres végétales.....	30
II.4.	Bétons autoplaçants fibrés.....	32
II.4.1.	Les propriétés des bétons autoplaçants fibrés à l'état frais.....	32
II.4.2.	Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés.....	34
II.4.3.	Comportement différée des bétons autoplaçants fibrés.....	34
II.4.4.	Comportement des bétons autoplaçants fibrés à haute température.....	35
II.5.	Conclusion.....	41

### CHAPITRE III :GENERALITESSUR L'ATTAQUE SULFATIQUE

III.1.	Introduction.....	43
III.2.	Origines des sulfates.....	44
III.3.	Mécanismes généraux de dégradation par les sulfates externes.....	44
III.4.	Les conditions de l'attaque sulfatique externe.....	47
III.5.	Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements sulfatiques (Les paramètres influent).....	48
III.5.1.	Le cation associé aux sulfates.....	48
III.5.2.	Le Ciment.....	48
III.5.3.	Le rapport E/C.....	50

III.5.4.	Les additions.....	50
III.6.	L'attaque sulfatique externe aux bétons autoplacants.....	51
III.7.	Conclusion.....	52

## **CHAPITRE IV :CARACTERISATION DES MATERIAUX TESTES ET PLAN EXPERIMENTAL**

IV.1.	Introduction.....	55
IV.2.	Programme expérimental.....	55
IV.3.	Constituants des mélanges.....	60
IV.3.1.	Le Ciment .....	60
IV.3.2.	Le Filler Calcaire.....	61
IV.3.3.	Les granulats.....	61
IV.3.4.	L'eau de gâchage.....	64
IV.3.5.	Super plastifiant.....	64
IV.3.6.	Les Fibres végétales.....	65
IV.3.7.	Les fibres Synthétiques (fibre de polypropylène).....	66
IV.4.	Composition des mélanges.....	67
IV.4.1.	Méthodes de formulation.....	67
IV.4.1.1.	Méthode chinoise.....	68
IV.4.1.2.	Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	70
IV.4.2.	Comparaison entre la formulation Bétonlab et chinoise.....	71
IV.4.3.	Formulations retenues.....	72
IV.4.4.	Fabrication des mélanges.....	72
IV.4.5.	Caractérisations des mélanges.....	76
IV.4.5.1.	Caractérisation a l'état frais.....	76
IV.4.5.2.	Caractérisation a l'état durcis.....	81
IV.5.	Propriétés étudiées.....	84
IV.5.1.	Variations dimensionnelles et pondérales.....	84
IV.5.2.	Comportement à l'élévation de température .....	85
IV.5.3.	Porosité capillaire.....	86
IV.6.	L'attaque sulfatique.....	87
IV.7.	Conclusion.....	89

## TABLE DES MATIÈRES

### CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

V.1.	Introduction.....	91
V.2.	Qualification des bétons d'autoplacant.....	91
V.2.1.	L'essai d'étalement.....	91
V.2.2.	Mobilité en milieu confiné.....	93
V.2.3.	L'essai V-Funnel.....	96
V.2.4.	L'essai de stabilité au tamis.....	97
V.2.5.	La densité.....	98
V.2.6.	L'air occlus.....	98
V.3.	Caractérisation mécanique des BAPF.....	99
V.3.1.	Résistance à la compression.....	99
V.3.2.	Résistance à la traction par flexion.....	101
V.3.3.	Module d'élasticité.....	103
V.3.4.	Relation du module d'élasticité avec la résistance à la compression.....	104
V.4.	Propriétés des BAPF.....	104
V.4.1.	Comportement différé sans charge et perte en poids.....	105
V.4.1.1.	Retrait total.....	105
V.4.1.2.	Retrait endogène.....	106
V.4.1.3.	Retrait de séchage.....	107
V.4.1.4.	Perte en poids.....	108
V.4.1.5.	Relation entre perte en poids et retrait.....	109
V.4.2.	Comportement thermo-mécanique.....	110
V.4.2.1.	La résistance à la compression résiduelle.....	110
V.4.2.2.	La perte en poids résiduelle.....	115
V.4.3.	Porosité capillaire.....	116
V.5.	Durabilité des BAPF (L'attaque sulfatique).....	117
V.5.1.	Observation visuelle de dégradation.....	117
V.5.2.	Caractéristiques mécaniques.....	118
V.5.2.1.	Résistance à la compression.....	118
V.5.2.2.	Résistance à la traction par flexion.....	119
V.5.3.	Variation dimensionnelle et pondérale.....	120
V.6.	Conclusion.....	121

## TABLE DES MATIÈRES

Conclusion générale .....	123
Références bibliographiques.....	125

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I: CONCEPT ET FORMULATION DES BETONS

### AUTOPLACANTS

Figure I.1: Action des super plastifiants -Défloculation des grains de ciment [05].....	9
Figure I.2 : Les utilisations des super plastifiants.....	9
Figure I.3 : Essai d'étalement.....	12
Figure I.4 : Essai de la boîte en L.....	12
Figure I.5 : Essai de V-Funnel .....	13
Figure I.6 : Essai de stabilité au tamis.....	14
Figure I.7 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring).....	15
Figure I.8. : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)[13].	16

## CHAPITRE II. LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

Figure II.1. Fibre métallique.....	20
Figure II.2 : Fibre de fonte amorphe.....	21
Figure II.3 : Fibre de verre.....	21
Figure II.4 : Fibres de polypropylènes.....	22
Figure II.5: Les différentes formes de fibres.....	22
Figure II.6: Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines.....	23
Figure II.7: Fibre de lin.....	24
Figure II.8 : Fibre d'ortie.....	24
Figure II.9: Fibre de la ramie.....	25
Figure II.10: Fibre de chanvre.....	25
Figure II.11: Fibre de jute.....	26
Figure II.12 : Fibre de palmier.....	26
Figure II.13 : Fibre bananier.....	27
Figure II.14 : l'effet de la teneur de fibre de polypropylène sur l'étalement.....	33
Figure II.15 : le retrait de séchage des bétons autoplaçants jusqu'à 180 jours.....	35
Figure II.16: comportement de béton autoplaçant renforcé par fibres métalliques et d'acier à haute température.....	36
Figure II.17 : la résistance résiduelle relative de BAP après 2 heures.....	37
Figure II.18: la résistance résiduelle relative de BAP après 4 heures.....	38

Figure II.19: comparaison entre la résistance de compression résiduelle d'un BAP et un béton ordinaire vibré.....	39
Figure II.20: Absorption d'eau capillaire des BAP et béton ordinaire.....	40

### **CHAPITRE III :GENERALITES SUR L'ATTAQUE SULFATIQUE**

Figure III.1 : origine des sulfates.....	44
Figure III.2 : l'influence de la composition du ciment sur l'expansion des mortiers soumis aux attaques des sulfates externe[40].....	49
Figure III.3 : l'influence de rapport E/C sur l'expansion des mortiers sous attaques des sulfates de sodium [ 40].....	50

### **CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX TESTES ET PLAN EXPERIMENTAL**

Figure IV.1 : Organigramme des essais réalisés.....	57
Figure IV.2. Courbes granulométriques des granulats concassés.....	63
Figure .IV.3 : fibre de chanvre.....	65
Figure.IV.4 : fibre de chènevotte.....	65
Figure .IV.5 : fibre de polypropylène.....	66
Figure IV.6 : Interface de Bétonlab Pro.....	70
Figure IV.7 : Malaxeur à béton utilisé.....	73
Figure IV.8 : Distribution des fibres à sec.....	73
Figure IV.9: (a) éprouvettes Cylindriques 10 x20cm , (b) éprouvettes prismatiques 7x7x28cm, (C) éprouvettes Cylindriques 16x32 cm,(d) éprouvettes cubiques10x10 x10 cm.....	74
Figure IV.10 : Bassin de conservation des éprouvettes.....	75
Figure IV.11: Principe de l'essai au cône d'Abrams.....	76
Figure IV.12: Essais de la boîte en L.....	77
Figure IV.13 : L'essai de V-funnel.....	78
Figure IV.14 : L'essai de J-Ring.....	79
Figure IV.15: Essai de stabilité au tamis.....	79
Figure IV.16: Aéromètre à béton.....	80
Figure IV.17 : Mesure de la masse volumique réelle.....	81
FigureIV.18 :Appareil d'essai de la résistance à la compression.....	82
FigureIV.19 : dispositif de l'essai de traction par flexion.....	83

FigureIV.20 : Appareil du module d'élasticité.....	84
Figure IV.21 : Mesure des variations dimensionnelles.....	85
Figure IV.22. Balance.....	85
Figure IV.23 : Four à moufle (1200 C°).....	86
Figure IV.24. Cycles de l'élévation de la température.....	86
Figure.IV.25 : essais d'absorption capillaire.....	87
Figure IV.26: Cycle séchage-mouillage de l'attaque sulfatique.....	88
Figure IV.27 : les bacs de conservation (solution (Na <sub>2</sub> S0 <sub>4</sub> )).....	88

## **CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION**

Figure V.1 : Relation entre l'étalement et T50.....	92
Figure V.2. : Les galettes obtenues au cours de l'essai d'étalement du (a) BAPT et (b) BAPCT.....	93
Figure V.3: Les résultats de l'essai de la boîte en L.....	94
Figure V.4: Les résultats de l'essai de J-Ring.....	95
Figure V.5 : La mobilité des BAPT, BAPCT, BAPCV au milieu confiné.....	95
Figure V.6 : Blocage de BAPPP.....	96
Figure V.7 : Les résultats de l'essai V-funnel.....	97
Figure V.8 : Stabilité au tamis.....	97
FigureV.9 : Valeur de la densité.....	98
FigureV.10 : L'essai de l'air occlus.....	99
Figure V.11 : Résistance à la compression des éprouvettes cylindriques (10x20) cm.....	100
Figure V.12 : Résistance à la traction par flexion sur prisme (7x7x28)cm.....	102
Figure V.13 : corrélation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.....	103
FigureV.14 :Evolution du module d'élasticité des différents types de bétons.....	103
Figure V.15 : relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.....	104
FigureV.16 : l'évolution de la déformation du retrait total des différents bétons.....	105
FigureV.17 : l'évolution du retrait endogène des différents bétons avec le temps.....	106
FigureV.18 : évolution du retrait totale et endogène desmélanges bétons autoplaçants.....	107
FigureV.19 : Evolution de retrait de séchage des différents bétons.....	108
FigureV.20 : Evolution de la perte en poids de différents types de bétons autoplaçants.....	109
FigureV.21 : la relation entre retrait et perte en poids pour différents types de béton.....	110
Figure V.22 : évolution de la résistance de compression en fonction de la température.....	111
Figure V.23: éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 110 °C.....	112
Figure V.24 : éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 220 °C.....	113
Figure V.25: éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 300 °C.....	114

## LISTE DES FIGURES

Figure V.26: éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 600 °C.....	115
FigureV.27 : évolution de la perte en poids des BAPF avec la température.....	116
Figure V.28 : Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité.....	117
Figure V.29:les fissures multidirectionnelles après cinq cycles pour les quatre mélanges.....	117
FigureV.30 : l'évolution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles de séchages-mouillageet le témoin (dans l'eau).....	118
Figure V. 31 : l'évolution de la résistance à la traction par flexion de différents types de béton après 5 cycles et le témoin (dans l'eau).....	119
FigureV.32 : Evolution de la variation dimensionnelle suivant les cinq cycles de différents types de bétons.....	120
FigureV.33 : Evolution de la perte en poids après cinq cycles séchage –mouillage des différents types de bétons.....	121

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE II. LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques des différentes fibres végétales.....	28
Tableau II.2: Composition chimique de quelques fibres végétales.....	29

## CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX TESTES ET PLAN EXPERIMENTAL

Tableau IV.1 : Notation des mélanges.....	58
Tableau IV.2 : Caractérisation des mélanges à l'état frais.....	59
Tableau IV.3 : Caractérisation classique des mélanges à l'état durci.....	59
Tableau IV.4 : Composition chimique du clinker.....	60
Tableau IV.5 : Composition Minéralogique du clinker.....	60
Tableau. IV.6. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	61
Tableau. IV.7. Composition chimique du filler calcaire.....	61
Tableau. IV.8. Composition physique du filler calcaire.....	61
Tableau. IV.9. Caractéristiques géométriques des granulats.....	62
Tableau. IV.10. Caractéristiques Physiques des granulats.....	63
Tableau. IV.11. Caractéristiques mécaniques des granulats.....	63
Tableau IV.12 : les résultats de l'analyse chimique de l'eau.....	64
Tableau IV.13. Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant GLINIUM26.....	65
Tableau IV.14. Caractéristiques physiques et chimiques des fibres végétales.....	66
Tableau VI.15 : caractéristiques de polypropylène.....	66
Tableau IV.16 : Quantité des constituants de base des deux formulations.....	71
Tableau IV.17 : Comportement des deux formulations à l'état frais.....	71
Tableau IV.18. : La composition retenue pour chaque mélange.....	72

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V. 1: Les résultats de l'essai de l'étalement.....	91
Tableau V.2: Les résultats du rapport H2/H1.....	93
Tableau V.3: Les résultats de l'essai de J-Ring.....	94
Tableau V.4: Les résultats de l'essai de V-funnel.....	96

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau V.5 : Les résultats de l'air occlus.....	98
Tableau V.6 : Résistance à la compression sur cylindres (10x20) en Mpa.....	100
Tableau V.7. Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 cm(Mpa).....	102
Tableau V.8 : le pourcentage entre les bétons avec des fibres et le témoin.....	106
Tableau V.9 : l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.....	111

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BF) et les bétons de poudres réactives (BPR).

Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie, les bétons autoplacants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. D'autre part, le champ d'utilisation des BAP est très varié du point de vue de la résistance mécanique (des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances), comme du point des applications visées (des bâtiments aux ouvrages d'art). Ceci confirme l'existence des BAP en tant que des bétons de structure à part entière.

Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économiques mais également social. Ainsi l'absence des vibrations des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe.

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau, mais aussi il est indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires ont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de fines ou l'emploi d'un agent de viscosité.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maitres d'ouvrages et maitres d'œuvre ce qui limite encore leur diffusion. Ce retour d'expérience, dont bénéficient les bétons vibrés (BV) employés jusqu'ici, est essentiel pour le comportement (mécanique et autre) à long terme des BAP. De plus la nécessité actuelle de trouver de nouvelles solutions techniques respectant le développement durable amène à étudier le caractère vieillissant du matériau béton, et plus particulièrement du béton autoplacant.

Depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle, les sociétés cherchent à limiter le réchauffement climatique et ses effets en essayant de trouver de nouvelles solutions de production et de consommation plus respectueuses de l'environnement. Les ressources végétales sont une solution plausible et intéressantes car elles répondent à deux impératifs : étant renouvelables, elles limitent l'utilisation des ressources d'origine fossiles et étant des puits de carbone, elles permettent de stocker le dioxyde de carbone. A l'heure actuelle, en Algérie et dans le monde, de plus en plus de recherches sont réalisées autour de ces ressources végétales et du développement de l'éco-matériaux utilisant partiellement ou totalement des ressources agricoles. Un éco-matériau parfois dit « matériau écologique » ou « matériau bio-sourcé » est un matériau de construction qui répond aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction, mais aussi à des critères environnementaux ou sociaux –environnementaux, tout au long de son cycle de vie.

Le béton et le mortier sont les matériaux les plus utilisés dans la construction, mais ils résistent mal à la traction et à la fissuration. Les conditions d'environnement chauds et secs, tel que la région saharienne de notre pays, dessèchent ces matériaux hydrauliques ce qui induit à des retraits importants et des fissures dans les structures.

Le renforcement des bétons par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques. Le renforcement des matériaux cimentaires par des fibres végétales est relativement nouveau par rapport à celui des fibres d'amiante ou d'aciers. La caractérisation de ce nouveau matériau composite nécessite alors, la multiplication des recherches et des essais, ainsi que le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

Devant l'évolution des matériaux composites, le béton et le mortier ne font pas l'exception, les chercheurs et les producteurs de fibres ont pensé à l'incorporation des fibres comme matériau de renfort dans les matrices cimentaires. Depuis lors, l'utilisation des fibres dans le béton est devenue de plus en plus une pratique courante. Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces nouveaux composites, à limiter et à contrôler la fissuration sous sollicitations mécaniques et à améliorer la résistance à la flexion et au choc.

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans le renforcement des bétons et des mortiers notamment : les fibres d'aciers, de polymère, de carbone et végétales.

Le renforcement par les fibres végétales à un avenir promoteur est spécialement pour les pays de tiers –monde, qui possèdent d'énorme quantité de ces fibres, mais aussi à cause du problème que pose actuellement l'utilisation des fibres d'amiante sur la santé humaine.

L'Algérie est parmi les pays, qui disposent d'extraordinaires ressources en fibres végétales (de palmier, Alfa, chènevotte, chanvre, coton.....), malheureusement, leur valorisation dans les domaines pratiques, entre autre, dans les matériaux de construction est encore peu exploitée.

Cela fait plus de 70 ans que de nombreuses attaques par les sulfates, présents naturellement dans le sous-sol, ont été constatés sur les fondations d'ouvrages en béton en milieu marin. Les dégradations de ces massifs de fondation sont attribuées en partie à la réaction des sulfates avec les hydrates de la matrice cimentaire.

Dans ce travail, nous proposons d'étudier certaines fibres végétales en vue d'évaluer les propriétés des bétons autoplacants. Comme indicateurs de ces propriétés, nous prendrons, outre la qualification des BAP, les performances mécaniques, le retrait, la porosité capillaire, l'élévation de la température et le comportement des BAPF vis-à-vis l'attaque sulfatique.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique, et a été mené pour répondre à plusieurs questions dont certaines, concernent l'évolution des propriétés mécaniques, physiques et quelques aspects de durabilité des BAP dans le temps. Malgré le nombre de travaux importants qu'on dénombre dans la littérature sur les BAP, des verrous technologiques méritent d'être levés.

-Est –ce qu'on peut formuler une matrice cimentaire fluide compatible avec les fibres (végétales et synthétiques) ?

-Le BAP renforcé par des fibres végétales est –il résistant que le béton non fibré ?

-L'introduction des fibres végétales dans les BAP conduit-elle à des solutions viables en termes de mise en œuvre, de résistances mécaniques et de durabilité (sous l'action de l'attaque sulfatique) ?

Les objectifs de ce travail sont d'amener à des réponses à ces questions.

Le mémoire est composé de cinq chapitres :

**Le premier chapitre** nous présenterons une synthèse des connaissances actuelles sur les bétons autoplacants en mettant en évidence les méthodes de formulations existantes, leurs propriétés rhéologiques.

**Le deuxième chapitre** est un état de l'art des travaux réalisés sur les BAPF en termes de formulation, de rhéologie, de propriétés mécaniques et de durabilité, en présentant le rôle de cette matrice fluide et des renforts sur le comportement du béton dans tous ses états.

**Le troisième chapitre** concerne la durabilité des bétons autoplacants, il s'intéresse à définir les notions de base et facilite la compréhension des phénomènes et mécanismes d'action mise en jeu.

Cette première partie à caractère « revue de littérature » se termine par une synthèse bibliographique, justifiant tous les choix en s'appuyant sur un corpus documentaire tenant compte de toutes avancées scientifiques les plus récentes.

**Le quatrième chapitre** s'intéresse, en premier lieu à la caractérisation des matériaux de base sélectionnés rentrant non seulement dans la composition de la matrice cimentaire mais aussi des renforts(deux modes très différents de renforcement ) et la conception des bétons autoplacants en utilisant deux formulations, une méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires, réside dans la nécessité d'utilisation de logiciel (béton Labpro) en parallèle, la méthode chinoise utilise une relation empirique pour estimer le dosage en ciment fondée sur des données empiriques.

La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la méthodologie d'essais de l'étude expérimentale. Tout d'abord la caractérisation à l'état frais des BAP (l'étalement, V-funnel, la boîte en L, J-ring, et la stabilité au tamis), ainsi que l'air occlus et la densité. Et enfin des essais de compression, de traction par flexion et le module d'élasticité sont élaborés pour caractériser les BAP à l'état durci. Déformations différées sans charge en mode endogène et de dessiccation et physico-chimiques(porosité capillaire, comportement à l'élévation de température (110,220,300,600 °C) et l'influence d'un milieu agressif (attaque sulfatique) sur les BAPF sont présentés.

**Le cinquième chapitre** représente les résultats expérimentaux concernant les caractéristiques à l'état frais et à l'état durci de toutes les formulations retenues qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs mécaniques en compression et traction par flexion, module d'élasticité statique, déformations différées sans charge en mode endogène et en dessiccation et physico-chimiques (porosité capillaire, comportement à l'élévation de température et résistance vis-à-vis l'attaque sulfatique) à partir des quelles ont été réalisées les comparaisons entre BAPT et BAPF.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale de nos travaux, ainsi que des perspectives qui en découlent les améliorations nécessaires à apporter, en proposant des études à réaliser comme suite aux travaux présentés.

**CHAPITRE I :**  
***CONCEPT ET FORMULATION DES BETONS***  
***AUTOPLACANTS***

## I. CONCEPT ET FORMULATION DES BETONS AUTOPLACANTS

### I.1.Introduction

Le concept des bétons autoplaçants (BAP) a été lancé en premier lieu par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon vers 1980. Leur objectif était de supprimer les opérations coûteuses liées à la vibration, et le ressuage afin d'accroître la productivité du chantier. Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibration. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire et ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondant aux bétons classiques. Sa mise en place nécessite une fluidité et une viscosité élevée, aucun signe de ségrégation, et le maintien d'une homogénéité parfaite. Le matériau frais doit donc s'écouler avec un débit important sans risque de blocage au droit des obstacles et sans risque de séparation des constituants. De plus le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton afin d'assurer l'homogénéité de ses propriétés mécaniques.

Ce chapitre traite des essais de caractérisation rhéologique recommandés pour vérifier les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais ainsi que les particularités de ces constituants sont rappelées et les différentes grandes familles de méthodes de formulation sont ensuite présentées des plus empiriques aux plus sophistiquées.

### I.2.Constituants des bétons autoplaçants

#### I.2.1. Le Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, une matière inorganique finement moulue qui gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. En ce qui concerne la fabrication des BAP, en principe tous les ciments conformes à la norme NF EN197-1 conviennent. Le choix correct du type de ciment est normalement imposé par les conditions spécifiques de chaque application.

#### I.2.2.Les granulats

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en milieu confiné, il faut en limiter le volume. Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être réduit par rapport à celui d'un béton traditionnel.

Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le  $D_{max}$  augmente [01]. Ainsi, le  $D_{max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

### **I.2.3. Les fines minérales**

Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau, mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales.

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ  $500 \text{ kg/m}^3$ ), pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé).

Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et fillers calcaires. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et auto-plaçantes du béton [02].

### **I.2.4. Les superplastifiants**

L'apparition des bétons auto-plaçants est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (Bury et al, cité par [03]). Les superplastifiants sont des produits organiques qui sont 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.

Ils agissent par adsorption à l'interface solide-eau, ce qui permet aux grains de ciment d'acquérir des charges identiques et créer ainsi un phénomène de dispersion des particules par répulsion électrostatique [04]. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment flocculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton (figure I.1). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles (Aitcin et al, cité par [05]).

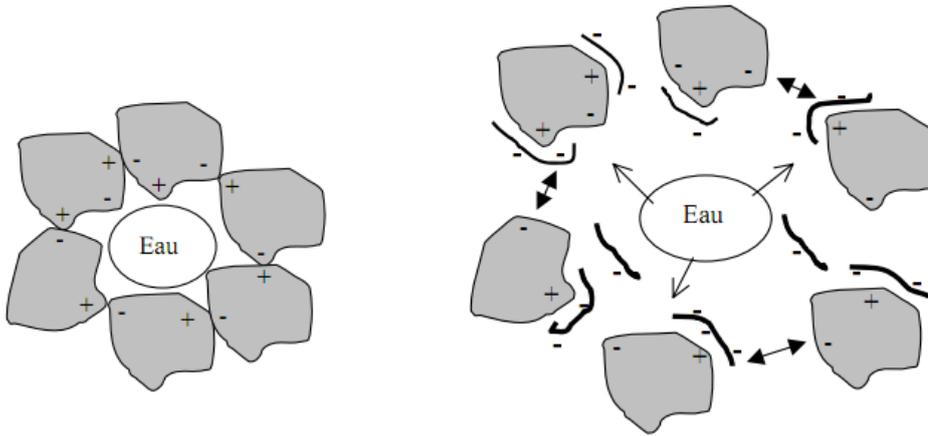


Figure I.1: Action des superplastifiants -Défloculation des grains de ciment [05].

L'utilisation de superplastifiants (figure I.2) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [06].

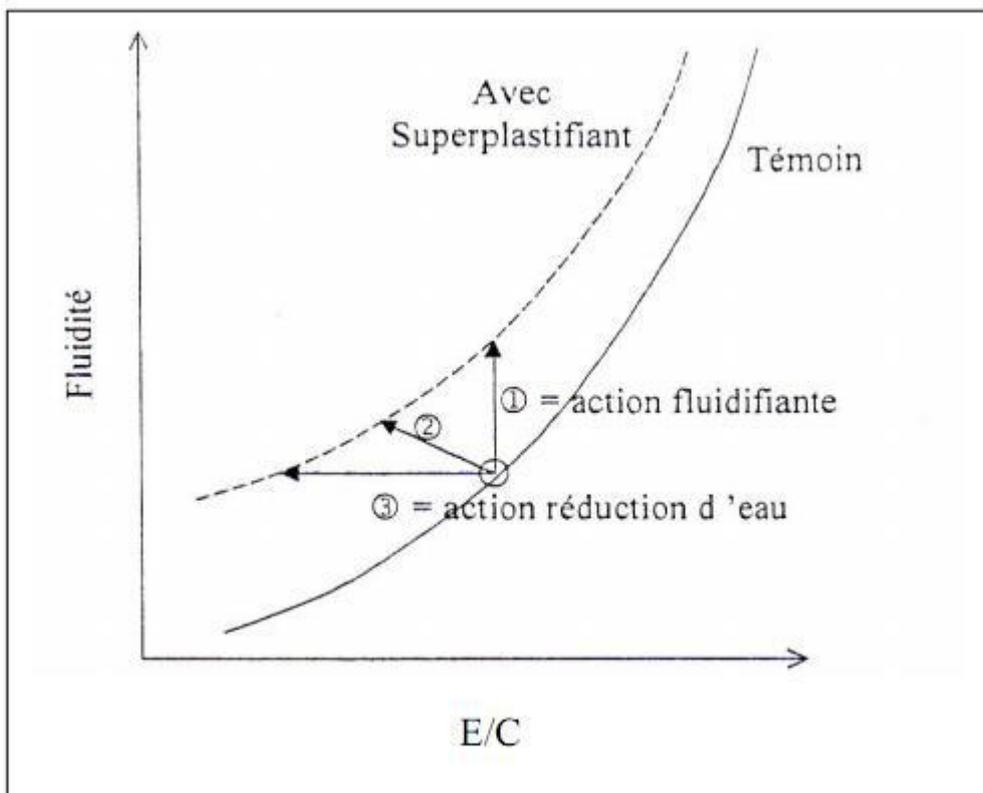


Figure I.2. Les utilisations des superplastifiants [06]

1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)

2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité

Les superplastifiants peuvent réagir, également, avec les hydrates de ciment [06]. Ainsi, l'action d'un superplastifiant lorsqu'il est introduit dans un mélange est décomposée comme suit: une partie adsorbée, une partie consommée par les réactions avec les hydrates et une partie en excès reste en solution (Flatt et Houst, cité par [03]).

Par ailleurs, le degré de compatibilité d'une combinaison ciment / superplastifiant se mesure à travers le maintien dans le temps de l'étalement du BAP (Aïtcin et al, cité par [06]). Certain auteurs montrent que plus le dosage en superplastifiant et le rapport E/C sont élevés, plus le comportement rhéologique se maintient dans le temps [07].

Sugamata et al, (cité par [03]) ont montré que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur caractéristique connue comme étant le 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 superplastifiants sont donc introduits dans la composition des BAP à un dosage proche du dosage à saturation.

La valeur de cette caractéristique dépend du moment d'introduction du superplastifiant lors du malaxage [08]. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible car l'hydratation du ciment est amorcée ce qui implique une consommation du superplastifiant par les hydrates moins importante (Bury et al d'après [03]). Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides.

### **I.2.5. Les Agents de viscosité**

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés celluloses, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales. Ces produits empêchent le ressuage et limitent les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse et en maintenant une répartition homogène des différents constituants granulaires.

La formulation d'un BAP requiert la sélection d'un couple agent de viscosité -superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage.

D'après l'AFGC [08], l'utilisation des agents viscosant se justifie dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés ( $\text{eau/fines} > 0,4$ ) car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles ( $\text{rapport eau/fines} < 0,3$ ). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [08].

### **I.3.Essais de caractérisation des BAP à l'état frais**

Les essais de caractérisation des BAP ainsi que leurs modes opératoires réalisés à l'état frais, garantissant le caractère autoplacant du béton, sont pratiquement universels, et avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que toutes les conditions de fluidité, de viscosité, de résistance à la ségrégation et de capacité à s'écouler à travers des armatures sont remplies. Il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

Parmi les essais préconisés pour valider une formule de BAP, on présentera ceux qui sont disponibles dans notre laboratoire (LMDC) avec leurs valeurs cibles recommandées par l'AFGC.

#### **I.3.1.Essai d'étalement au cône d'Abrams**

C'est l'outil de contrôle le plus utilisé sur chantier pour caractériser l'ouvrabilité des bétons, et qui permet de donner une indication sur la mobilité de ces derniers en milieu non confiné. A partir de cet essai on accède à l'étalement désigné par Slump flow. Cet étalement est caractérisé par la moyenne de deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue en fin d'essai (Figure I.3).

Les valeurs cibles d'étalement préconisées pour un BAP se situent entre 550 et 850 mm. Ainsi trois classes ont été définies [10] :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm,
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm,
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton qui se manifeste par l'accumulation de gravier au centre de la galette avec présence d'une épaisseur de laitance à ses extrémités.

On mesure également le temps écoulé pour obtenir une galette de diamètre 500 mm, grandeur désigné par «  $T_{500}$  » pour estimer la viscosité des bétons.

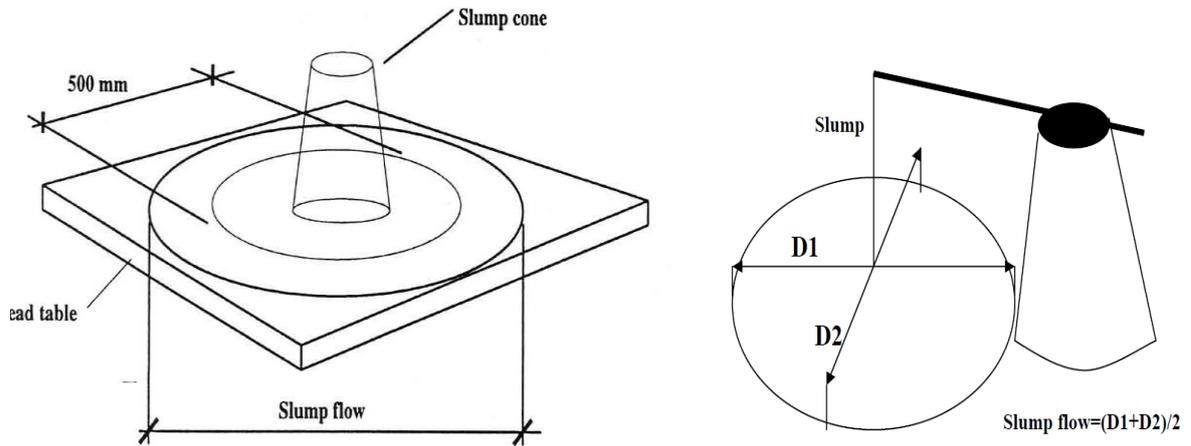


Figure I.3 : Essai d'étalement

### I.3.2. Essai de la boîte en L

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieux confinés. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois et après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard forme de 3 barres d'armature  $\varnothing 16$  mm distantes de 50 mm (Figure I.4).

Le temps d'écoulement doit de préférence être compris entre 3 et 7 secondes. On mesure la hauteur atteinte par le béton aux deux extrémités de la partie horizontale ( $h_1$  et  $h_2$ ) afin de qualifier sa capacité de remplissage. Le rapport  $h_2/h_1$  devrait être supérieur à 0,80[10].

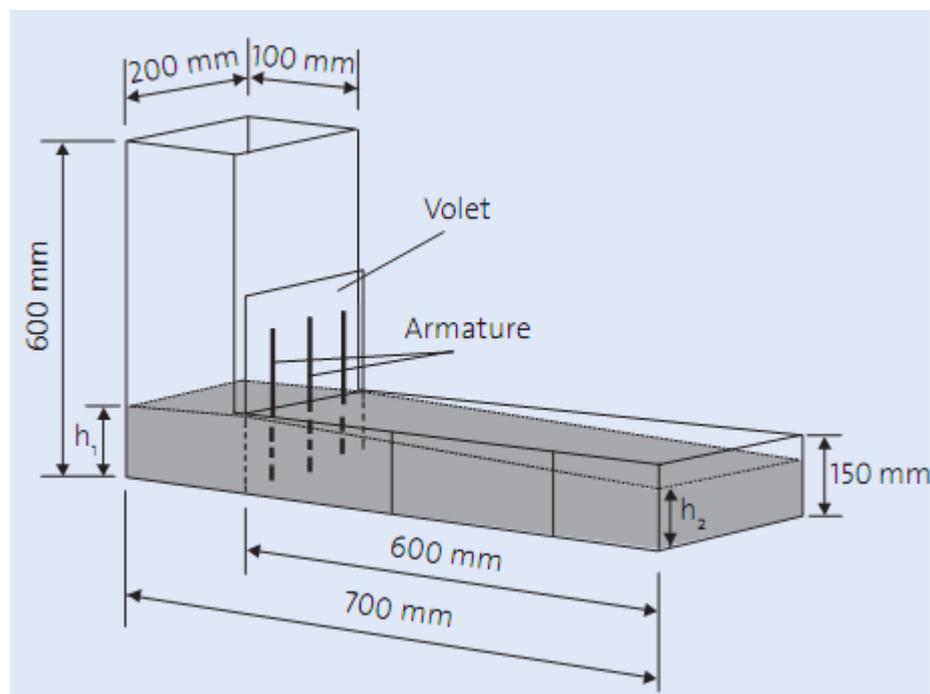


Figure I.4 : Essai de la boîte en L

### I.3.3. Essai de l'entonnoir en forme de V « V-Funnel »

Cet essai a été développé par Ozawa et al, (cité par [11]). Il consiste à mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de 10 litres de béton à travers un entonnoir en forme de « V » (Figure I.5).

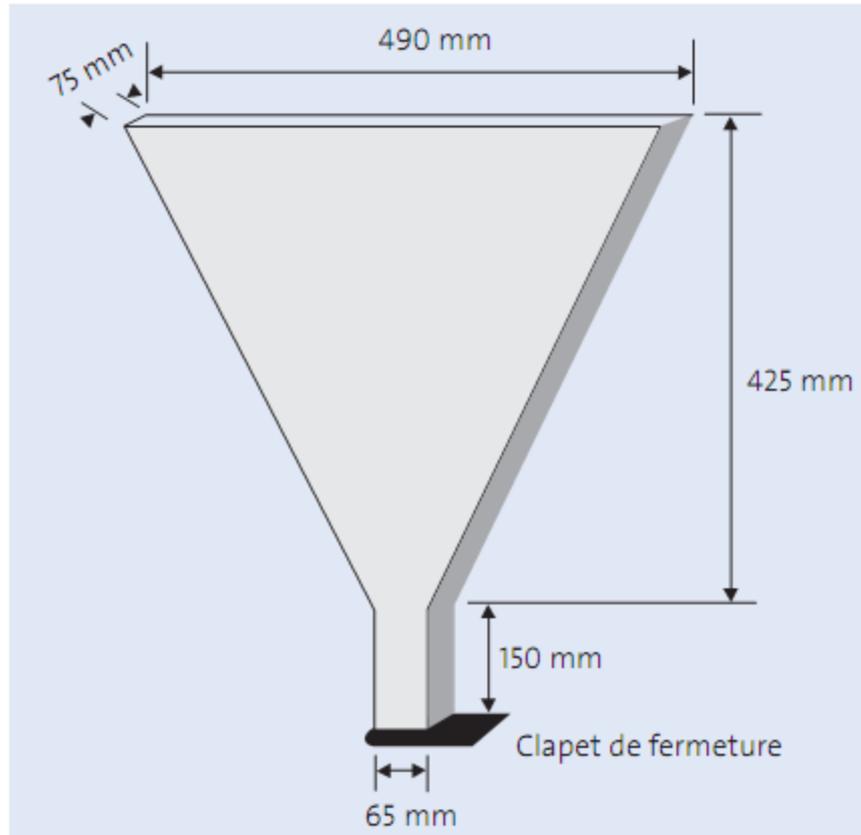


Figure I.5 : Essai de V-Funnel

Le temps d'écoulement est déterminé suivant une procédure très simple : c'est le temps mesuré à partir de l'ouverture de l'orifice jusqu'à l'écoulement total du béton. Plusieurs auteurs [11] ont montré que cet essai permettait d'évaluer la fluidité du béton mais également sa stabilité lors de l'écoulement (Plus le temps d'écoulement est long moins le béton est fluide et plus il est visqueux.).

D'après les spécifications deux classes de viscosité ont été définies [12]:

- VF1 si le temps d'écoulement « $t$ » est inférieure à 8s. Cette classe correspond à  $T500 \leq 2s$
- VF2 pour un temps d'écoulement compris entre 9 et 25s. Cette classe correspond à  $T500 > 2s$ .

### I.3.4. Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, Cet essai vise à quantifier l'aptitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de la prise. L'essai consiste à prélever une quantité définie de béton frais ( $4,8 \pm 0,2$  kg) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15mn, de la déverser sur un tamis de maille 5 mm avec une hauteur de chute de 50 cm et de peser après 2 minutes la laitance qui a traversé le tamis. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes [10]:

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

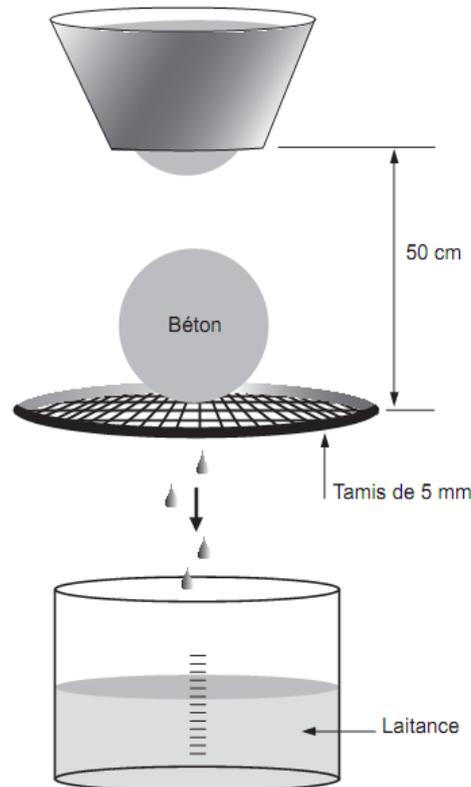


Figure I.6 : Essai de stabilité au tamis

### I.3.5. Essai d'étalement modifié (J-Ring)

Il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres  $\varnothing$  16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton

autoplaçant satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

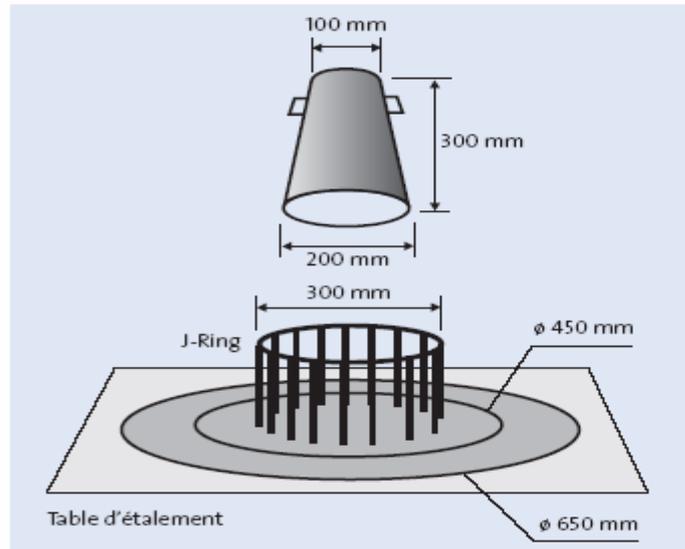


Figure I.7. Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)

#### I.4. Méthodes de formulation des BAP

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

[Turcry04][13] a regroupé ces méthodes en trois grandes familles qui sont :

- ❖ La méthode basée sur l'optimisation des mortiers.
- ❖ La méthode basée sur l'optimisation de la pâte.
- ❖ La méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire.

##### I.4.1. Méthode basée sur l'optimisation des mortiers

Okamura cité par [13], le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al (cité par [13]) proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg, Jacobs et al (cité par [13]) montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

#### I.4.2. Méthode basée sur l'optimisation de la pâte

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

Oh et al introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

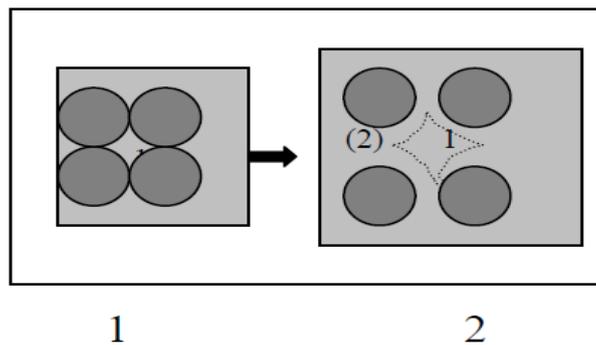


Figure I.8. : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2) [13].

Oh et al cité par [13] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

#### I.4.3. Méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure I.8, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie [13]. Sedran et de Larrard cité par [13] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton

### **I.5. Conclusion**

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport de la vibration et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants et des additions minérales. Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes d'essais simples afin de mieux caractériser ce béton.

Le BAP fait partie des matériaux quasi fragiles qui présentent une résistance à la traction nettement plus faible qu'à la compression.

Obtenir un béton autoplacant plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches, la voie la plus évoquée dans la littérature pour palier à cette faiblesse en comportement en traction consiste en l'ajout des fibres dans la formulation des bétons.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude, en associant une matrice très fluide avec des renforts, pour éviter la formation d'oursins, en étudiant la formulation et diverses propriétés des composites autoplacants ainsi élaborés.

**CHAPITRE II :**  
***LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES***

## II. LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

### II.1. Introduction

Le renforcement des matériaux de construction, en l'occurrence les bétons et les mortiers, par des fibres est une technique de plus en plus utilisée dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques, notamment leurs résistances à la traction et à la fissuration ainsi que la ductilité.

Le rajout de fibres pour renforcer est une technique très ancienne, en effet, nos prédécesseurs utilisaient la paille pour renforcer l'argile. Et le crin (poils de chevaux) pour renforcer différents mortiers ou le plâtre [14-15-16].

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps beaucoup de développements et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. Des fibres de toutes natures ont été expérimentées. Les plus répandues sont les fibres d'amiantes, de verre, d'acier, de plastique, de carbone et végétales.

### II.2. Les fibres

Le terme " Fibre " se rapporte à un corps solide flexible, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre de quelques millimètres dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle. Les fibres se trouvent sous diverses formes différentes soit par la nature (métalliques, minérales, végétales et synthétiques) soit par les dimensions (macro ou micro-fibres), soit par la forme (droites, ondulées, crochetées aux extrémités...etc.) et bien évidemment par leurs propriétés mécaniques.

### II.3. Différents types de fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant qu'elles soient naturelles ou artificielles.

Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

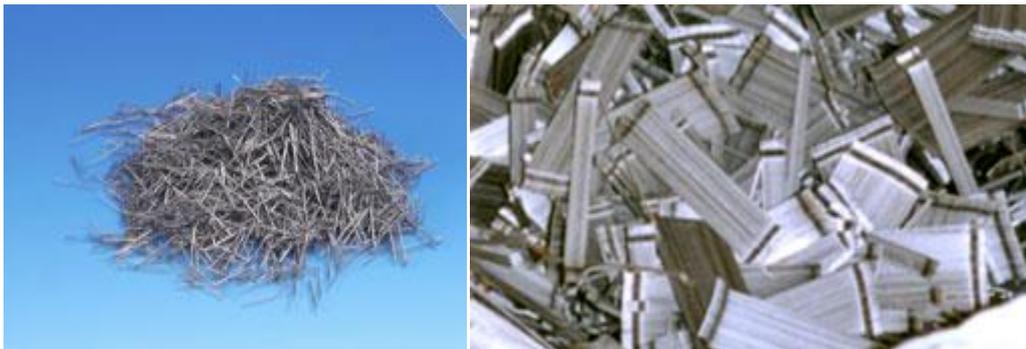
- ✓ fibres minérales : verre, carbone.
- ✓ fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- ✓ fibres organiques : polypropylène, acrylique.
- ✓ fibres naturelles : Hévéa, Sisal ...

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

### II.3.1. Les Fibres métalliques

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

La figure II-1 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton.



*Figure II.1. Fibre métallique*

### II.3.2. Les Fibres de fonte amorphe

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque, d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3 mm de largeur (figure II.2), contribuent à la limitation des fissures sous chocs.



*Figure II.2 : Fibre de fonte amorphe*

### **II.3.3. Les Fibres de verre**

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibres de faible diamètre (Figure II.3), le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.



*Figure II.3 : Fibre de verre*

### **II.3.4. Les Fibres de polypropylène**

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

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

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



Figure II.4 : Fibres de polypropylène

### II.3.5. Les Fibres végétales

Une fibre végétale est une expansion cellulaire morte qui est principalement composée de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine et de pectines. Elle est soit isolée soit regroupée avec d'autres en un faisceau.

Il est primordial de ne pas confondre fibre unitaire (ou fibre élémentaire) et faisceau de fibres. Une fibre unitaire correspond à une cellule élémentaire fibreuse, qui, regroupée avec d'autres, forme un faisceau de fibres ; le lien interstitiel entre les fibres unitaires étant composé principalement de pectines et d'hémicelluloses. Ce sont généralement ces faisceaux de fibres qui sont communément appelés « fibres végétales ».

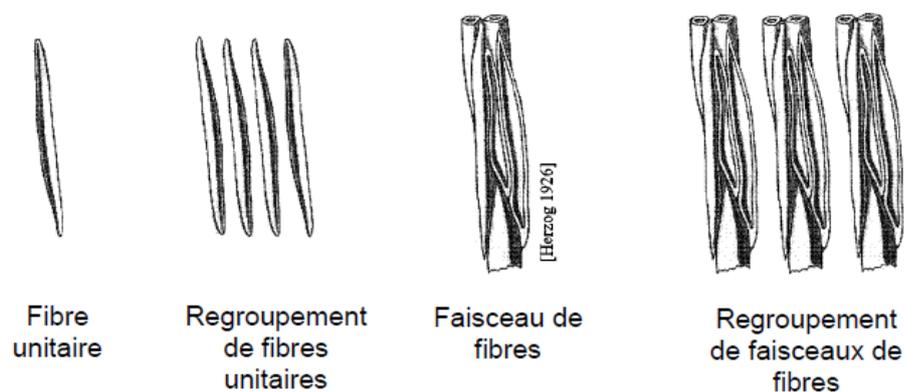


Figure II.5: Les différentes formes de fibres

Une fibre végétale est caractérisée par sa finesse et sa forme allongée par rapport à son diamètre. Laplupart des fibres végétales mesurent entre 10 et 150 mm de long pour un diamètre de 10 à 50  $\mu\text{m}$ , soit un rapport longueur sur diamètre compris entre 10 et 100.

### II.3.5.1. Origines des fibres végétales

Les fibres végétales peuvent être issues de différentes parties de la plante : des graines (poils séminaux), de la tige ou du tronc (fibres libériennes), des fruits (enveloppe) ou des feuilles. Le bois est un cas particulier (composition, structure, etc.) qui doit être traité séparément.

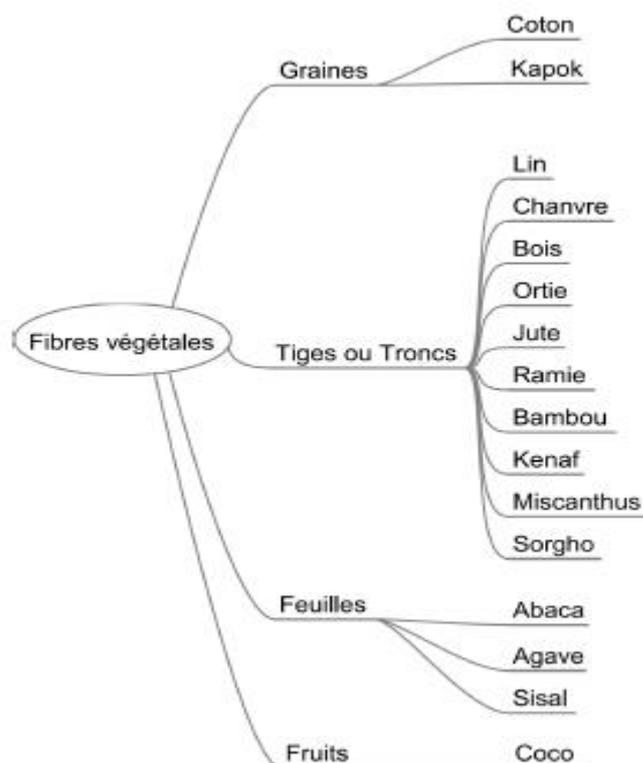


Figure II.6: Classification des fibres végétales en fonction de leurs origines

### II.3.5.2. Type des fibres végétales

#### ➤ Lin

Le lin appartient à la famille des linacées (la variété cultivée est la *Linum usitatissimum*; ce qui signifie « utile »). C'est une plante annuelle dont la tige atteint de 0,60 à 1,20 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm.

On récupère les fibres situées à l'extérieur de la tige, sous forme de faisceaux, qui constituent la fibre technique. Cela requiert trois opérations : le rouissage, le teillage et le peignage.

La cellule élémentaire (ou « fibre ultime ») de lin apparaît comme un cylindre imparfait polygonal, généralement à six côtés, comportant éventuellement un lumen (cavité centrale).



*Figure II.7: Fibre de lin*

➤ **Ortie**

Les fibres sont extraites de la grande ortie (*Urtica Dioica*), plante très commune en France. C'est une plante herbacée, vivace, de la famille des Urticaceae et du genre *Urtica*, bien connu en raison des brûlures qu'elle provoque. Jadis, les fibres d'ortie étaient largement utilisées pour fabriquer des cordages, des fils et des vêtements.

Pour faciliter l'extraction des fibres, les tiges devaient subir une opération de rouissage. Les orties étaient encore cultivées lors des deux précédentes guerres mondiales en complément du lin et du chanvre.



*Figure II.8: Fibre d'ortie*

➤ **Ramie**

La ramie (*Boehmeria nivea* aussi appelé ortie de chine) est un arbuste de la famille des Urticacées, originaire d'Asie (en anglais China grass). Elle se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles. L'extraction de la fibre nécessite un décorticage et un dégommeage très poussés. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre une concentration en cellulose

importante, une haute cristallinité et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent habituellement à l'habillement.



*Figure II.9: Fibre de la ramie*

### ➤ Chanvre

Le chanvre (*Cannabissativa*) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m qui est, comme le lin, l'une des plantes les plus anciennement connues. Le terme Cannabis veut dire « deux tiges » (*Canna-bis*), car c'est au départ une plante dioïque c'est-à-dire qu'il existe des plants mâles et des plants femelles. Aujourd'hui, on cultive des plantes monoïques dont la teneur en produit stupéfiant, le cannabinoïde, est parfaitement maîtrisée génétiquement.

Le processus d'obtention de la fibre technique du chanvre est comparable à celui du lin. Traditionnellement le rouissage du chanvre se faisait à l'eau, technique aujourd'hui interdite car très polluante.



*Figure II.10: Fibre de chanvre*

### ➤ Jute

Le jute (ou chanvre du Bengale) est une plante des régions tropicales (famille des malvacées, genre *Corchorus*) appartenant à la famille des liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm.

Il en existe deux principales variétés : le jute blanc (*C. capsularis*) et le jute rouge (*C. olitorius*). La fibre ultime est très courte et très lignifiée. L'extraction de la fibre technique (la filasse) est obtenues par rouissage (10 à 20 jours dans de l'eau stagnante suivant les conditions climatiques), les tiges sont par la suite écrasées puis décortiquées. Cette filasse est par la suite lavée puis séchée au soleil.



*Figure II.11: Fibre de jute*

#### ➤ **Palmier Dattier**

Certains palmiers sont utilisés à des fins textiles ; les fibres sont extraites soit des feuilles ou palmes (raphia, cocotier, palmier..), soit des fruits (cocotier). Dans les noix de coco, les fibres constituent les faisceaux conducteurs du mésocarpe (coir). Il représente les deux tiers de l'enveloppe de la noix de coco et est aussi appelé bourre. Ces fibres sont fortement lignifiées.



*Figure II.12 : Fibre de palmier*

➤ **Kéna**

Le kéna ou chanvre de Deccan est un *Hibiscus cannabinus* L. ou *H. sabdariffa* L. (famille des Malvaceae), plante annuelle à tiges épineuses de 2 à 4 m qui pousse essentiellement dans les zones tropicales humides (Inde, Afrique, Ile de Java). La fibre de kéna a des qualités comparables à celles du jute.

➤ **Banani**

Les banani sont connus pour leurs fruits, mais certains comme l'abaca, ou « chanvre de manille », sont cultivés depuis longtemps aux Philippines et en Equateur pour leurs fibres textiles. Les fibres élémentaires sont de deux sortes : celles appartenant au sclérenchyme qui forment une couronne sous-épidermique, celles qui représentent l'ensemble des faisceaux conducteurs et leur gaine. Lorsque le pseudotrunc (il n'existe pas de tige véritable) du bananier arrive à maturité, les fibres sont extraites manuellement par raclage et lacération au couteau. Elles sont ensuite mises à sécher.



*Figure II.13: Fibre bananier*

### **II.3.5.3. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales**

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

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs.

Le tableau II.1 représente quelques caractéristiques mécaniques et physiques.

*Tableau II.1 : Caractéristiques mécaniques et physiques des différentes fibres végétales*

<b>Fibres</b>	<b><math>E</math> (GPa)</b>	<b><math>A</math> (%)</b>	<b><math>\sigma_u</math>(MPa)</b>	<b>Densité</b>
<b>Lin</b>	12 à 85	1 à 4	600 à 2 000	1,54
<b>Chanvre</b>	23,5 à 90	1 à 3.5	270 à 900	1.5
<b>Ortie</b>	$87 \pm 28$	$2,11 \pm 0,81$	$1\ 594 \pm 640$	/
<b>Ramie</b>	24,5 à 128	1,2 à 4	400 à 1 000	1,51
<b>Jute</b>	26,5	1,5 à 1,8	393 à 773	1,44
<b>Sisal</b>	9 à 21	3 à 7	350 à 700	1,45
<b>Coir (noix de coco)</b>	4 à 6	15 à 40	131 à 175	1,15
<b>Coton</b>	5,5 à 12,6	7 à 8	287 à 597	1, 5 à 1,6
<b>Palmier dattier</b>	2.1 à 5.25	7.5 à 17.4	170 à 290	0.51 à 1.08

#### **II.3.5.4. Les caractéristiques chimiques des fibres végétales**

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

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

##### **➤ 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, est un polysaccharide à chaîne courte ramifiée et repliée sur elle-même. C'est le constituant responsable de l'élasticité des fibres et qui permet aux parois de s'allonger pendant la croissance.

##### **➤ Lignine**

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

Le tableau II.2 présente la composition chimique de quelques fibres végétales (noix de coco, sisal, jute et palmier dattier).

*Tableau II.2: Composition chimique de quelques fibres végétales*

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

#### **II.3.5.5. Critère de choix du type de fibres**

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et diffèrent selon leur nature ou leur géométrie. Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

Leur géométrie est très variable. 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 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.

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

### **II.3.5.6. Matrice cimentaire et fibres végétales**

Depuis l'antiquité, les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort dans diverses applications (habitation, poteries...). Cependant, c'est seulement ces vingt dernières années qu'elles suscitent un engouement dans le secteur des composites à base cimentaire, que ce soit dans le domaine du bâtiment ou en science des matériaux [17].

Les fibres végétales comme le chanvre sisal, le jute, le lin, ou encore le bambou, et les fibres de bois ont été utilisées comme renforts des matrices cimentaires dans les pays en voie de développement, dans le secteur du bâtiment. La résistance en flexion de ces matrices fragiles, telles les mortiers ou les pâtes de ciment, peut être considérablement améliorée grâce aux propriétés mécaniques des fibres (résistance en traction élevée). Les études publiées sur ces composites portent essentiellement sur leur comportement mécanique.

R.Hamzaoui(2013) [18] ont étudié l'influence des fibres de chanvre sec et humide sur les propriétés mécaniques (résistance à la flexion et à la compression) d'un mortier, ainsi que l'effet de la concentration optimale des fibres de nanotube de carbone ajouté dans la formulation. La phase de ciment est remplacée par différents pourcentages de fibres de chanvre sèches ou humides, allant de 1,1 % en poids jusqu'à 3,1 % en poids tandis que les nanotubes de carbone sont dispersés dans la solution aqueuse. Les résultats expérimentaux montrent que les résistances de compression et à la flexion de mortier avec fibres humides sont plus élevés que ceux pour les mortiers avec de fibre de chanvre sec.

E.Awwad et al (2012) [19] ont fait une étude sur le béton renforcé de fibres en utilisant des fibres de chanvre et polypropylène avec une longueur de 3cm et un teneur de (0.5%, 0.7%, 1%) de volume du béton. Ils ont constaté que la résistance à la compression des bétons avec le polypropylène de 0,5% a diminué de 3 %, 17% et 13%, à 3, 7 et 28 jours, respectivement, et la résistance à la compression pour 0,5% de chanvre a diminué d'environ 20 %, à 7 et 28 jours d'âge du béton. Et que la résistance à la traction de fendage est réduite d'environ 15-30 % pour les mélanges de chanvre de 0,5 %. Ils ont conclu que l'application de ce type de béton (avec chanvre) est utilisable pour les applications non structurelles telles que la maçonnerie, carrelage, pavés.

Zhijian Li et al (2005) [20] ont étudié l'effet des fibres de chanvre sur les propriétés mécaniques et physiques du béton. Les résultats indiquent que la teneur en fibre est le facteur critique qui affecte les propriétés de compression.

O. Bahloul et al (2009)[21] ont étudié l'analyse des propriétés mécaniques et physiques des mortiers de ciment à base de fibres cellulosiques d'alfa avec un pourcentage volumiques à savoir (0.5, 1, 1.5, 2 et 3)% et (4.5 - 4.75) cm de longueur. Les résultats des essais ont révélé que le pourcentage optimal de fibres à incorporer dans le mortier est de 1%. Ils ont constaté que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de fibres dans les différents mortiers et que le mortier témoin reste le plus résistant, et ils ont remarqué qu'à chaque fois qu'on augmente le pourcentage de fibres dans le composite, la conductivité thermique diminue et ceci s'explique par le fait que les fibres incorporées engendrent dans le matériau une porosité et une baisse de masse volumique. .

A. Kriker et al (2005)[22] D'après les études réalisées par A.Kriker, et dans le but d'améliorer les performances mécaniques des mortiers de fibres dans les climats chauds et secs, les éprouvettes sont conservées initialement dans un environnement humide durant 7 et 14 jours avant de les exposer à l'environnement chaud et sec (étuve). Il a constaté que la prolongation de la durée de cure initiale dans l'eau a effectivement amélioré les résistances à la compression et à la flexion des mortiers par rapport à celle des mortiers conservés directement dans l'étuve. Cette amélioration dans les résistances à la compression et à la flexion par le traitement est attribuée à l'activation thermique du processus d'hydratation.

## **II.4. Bétons autoplaçants fibrés**

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

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

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

### **III.4.1. Les propriétés des bétons autoplaçants fibres à l'état frais**

Les bétons autoplaçants (BAP) possèdent des caractéristiques exceptionnelles de fluidité à l'état frais.

L'inclusion de fibres dans les BAP va étendre ses avantages. Les fibres retardent la propagation des fissures et ainsi améliorent la résistance à la traction et à la flexion et la ténacité du béton durci. Par conséquent, l'utilisation de fibres peut limiter les champs d'application possibles de ce type de béton. Toutefois, ces renforts sont également connus pour affecter les caractéristiques de la maniabilité et l'écoulement de béton à l'état frais. La mesure dans laquelle l'ouvrabilité diminue tout dépend du type, la géométrie (longueur et le diamètre) et de la teneur de fibres utilisées, la matrice et de ses constituants dans laquelle elles sont intégrées. Une bonne distribution de fibres, cependant, est nécessaire afin d'obtenir leurs avantages optimaux.

En fin de compte, un compromis entre maniabilité acceptable du béton frais et de meilleures performances du béton durci doit être fait.

La question qui se pose de savoir si les fibres sont préjudiciables à la maniabilité de BAP et s'il est possible de maintenir l'ouvrabilité du béton autoplaçant.

Il y a très peu d'informations au sujet de l'utilisation des fibres sans affecter les caractéristiques fondamentales des BAP (fluidité, la viscosité, capacité de remplissage).

A.S. El-Dieb et al(2012) [23] ont fait une étude expérimentale pour déterminer l'influence de la teneur et le type des fibres (polypropylène et acier) sur les caractéristiques à l'état frais des bétons autoplaçants. Les teneurs en fibres synthétiques qui sont utilisées étaient de 600, 900, 1200, 1500 et 1800  $\text{g/m}^3$ , pour les aciers, quatre volumes de fibres d'acier étaient de 0,5%, 1,0%, 2,0% et 3,0%, Les principaux résultats qu'ils ont trouvé que les caractéristiques de l'écoulement diminuent proportionnellement avec l'augmentation du volume de la fibre. Ils ont montré aussi que la teneur maximale qui pourrait être inclus dans les mélanges sans affecter l'étalement du BAP est de 1300 à 1400  $\text{g/m}^3$  en fonction de la composition du mélange.

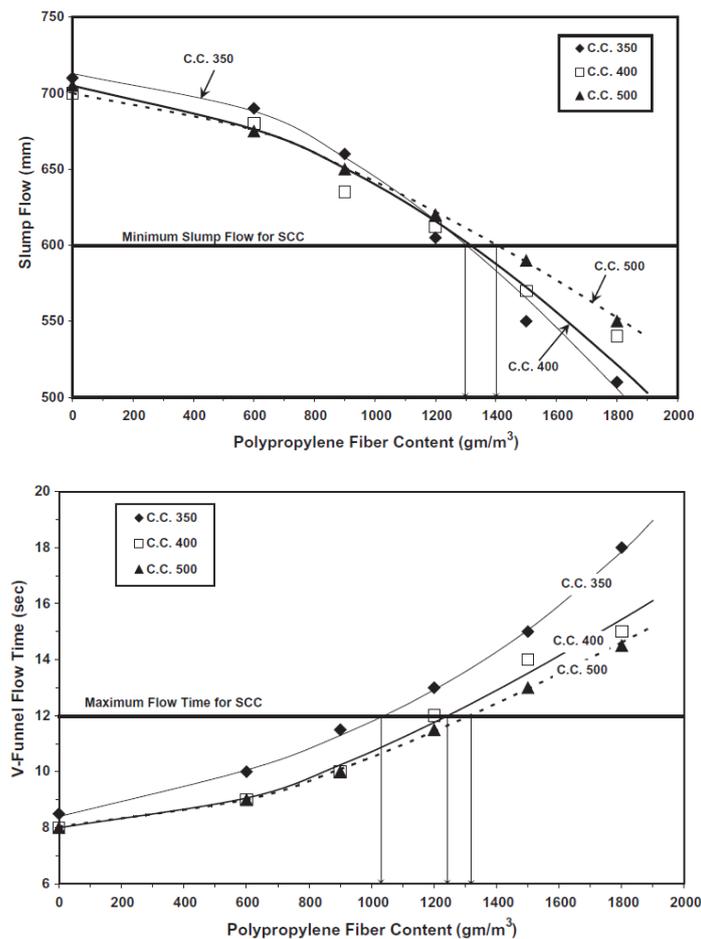


Figure II.14 : L'effet de la teneur de fibre de polypropylène sur l'étalement[23]

H. Mazaheripour et al [24] ils ont trouvé qu'avec un pourcentage de 0,3% de fibre polypropylène dans un béton autoplaçant entraîne une réduction de 40% de l'étalement (de 720 mm à 430 mm).

#### **III.4.2. Comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés**

H. Mazaheripour et al [24] ont fait une investigation expérimentale sur l'impact des fibres de polypropylène sur les performances d'un béton autoplaçant à l'état frais, ainsi que ses propriétés mécaniques à l'état durci. Leurs résultats indiquent que ce type de renfort n'affecte pas la résistance à la compression et le module d'élasticité, et il ya une amélioration de la résistance en flexion.

M.A.S. Mohamed, et al [25] ont présenté une étude expérimentale portant sur la valorisation des micros fibres végétales résultant de carton recyclé dans les bétons autoplaçants et son mortier équivalent afin d'optimiser la formulation de ce type de béton. Ils ont utilisé six différentes fractions volumiques de fibres par volume de ciment 14%, 21%, 28%, 41%, 83% et 138%. Ainsi, sept mélanges différents de mortier équivalent en maintenant constant le rapport de l'eau par un liant ( $E / L = 0,35$ ). Les résultats montrent que les résistances à la compression et à la flexion sont améliorées pour  $V_f = 21\%$ , ce qui peut être considéré comme une fraction volumique de fibres optimale en CEM en particulier pour un âge supérieur à 7 jours. Ils ont conclu aussi que la méthode de CEM est efficace pour évaluer les propriétés frais et durcis des BAP. De plus, la résistance à la compression au jeune âge, moins de 3 jours, a été réduite en ajoutant de ces fibres. Comme la teneur en fibres volumétrique dépasse 41%, la résistance à la compression et la densité sont considérablement réduites. Les chercheurs mentionnent qu'il y a peu de recherches qui ont évalué les effets de fibres de cellulose sur la maniabilité, les caractéristiques de retrait empêché, la ténacité et la durabilité des BAP.

#### **III.4.3. Comportement différé des bétons autoplaçants fibrés**

Les déformations différées des bétons résultent de deux phénomènes qui sont le retrait et le fluage, qu'elles soient d'origine de dessiccation, mécanique sous contrainte ou physicochimiques peuvent mettre en cause la durabilité des ouvrages.

Valeria Corinaldesi et al [26] ils ont étudié l'influence des différentes fibres (acier et polypropylène) sur le comportement des bétons autoplaçants. Parmi les principaux résultats est que les fibres empêchent la variation dimensionnelle (retrait de séchage) comme montré dans la figure II .15 :

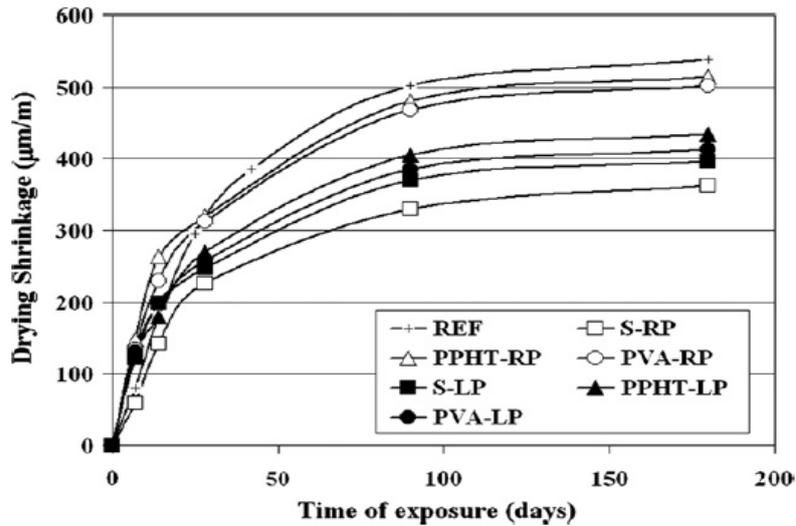


Figure II.15 : le retrait de séchage des bétons autoplaçants jusqu'à 180 jours [26]

Les auteurs ont conclu que l'effet des fibres sur le retrait des bétons dépend de la composition de la matrice cimentaire (ciment plus addition). Concernant la résistance mécanique, les fibres de polypropylène ont donné une basse de résistance par rapport au témoin et les fibres d'acier. A titre exemple BAP avec polypropylène présente une valeur de flexion entre 6 et 7 MPA et le témoin 11 MPA. Mais tous les résultats se trouvent dans les fourchettes d'un béton structurel.

#### II.4.4. Comportement des BAP fibrés à haute température

Yining Ding et al[27] ont travaillé sur les effets des fibres polypropylènes, métalliques sur les performances mécaniques (résistances à la compression, flexion) d'un béton autoplaçant à haute performance, ainsi que la résistance après l'exposition à différents haute température. Leurs résultats montrent qu'il y a une influence négative des fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques des BAP, par contre les fibres métalliques améliorent les propriétés fragiles de béton à un matériau ductile, mais aucune amélioration significative de résistance à la compression a été observée. Les résultats montrent que les BAP témoin a une perte de résistance à la compression de 17%, 67% et 94% par rapport à la résistance initiale sous une température de 300°C, 600 C° et 900 C. Cette perte de résistance est due à une faible perméabilité et de la microstructure dense, ce qui limite la libération de la pression au pores et conduit à l'accumulation de la pression interne. Par contre les BAP renforcé par le polypropylène à une perte de compression moins que le BAP témoin qui a un pourcentage de 14%, 11% et 89 % sous les différentes températures. Pour les BAP renforcé par des fibres métalliques ils ont trouvé qu'il y a une petite perte de résistance par rapport au témoin avec différents dosage de fibre.

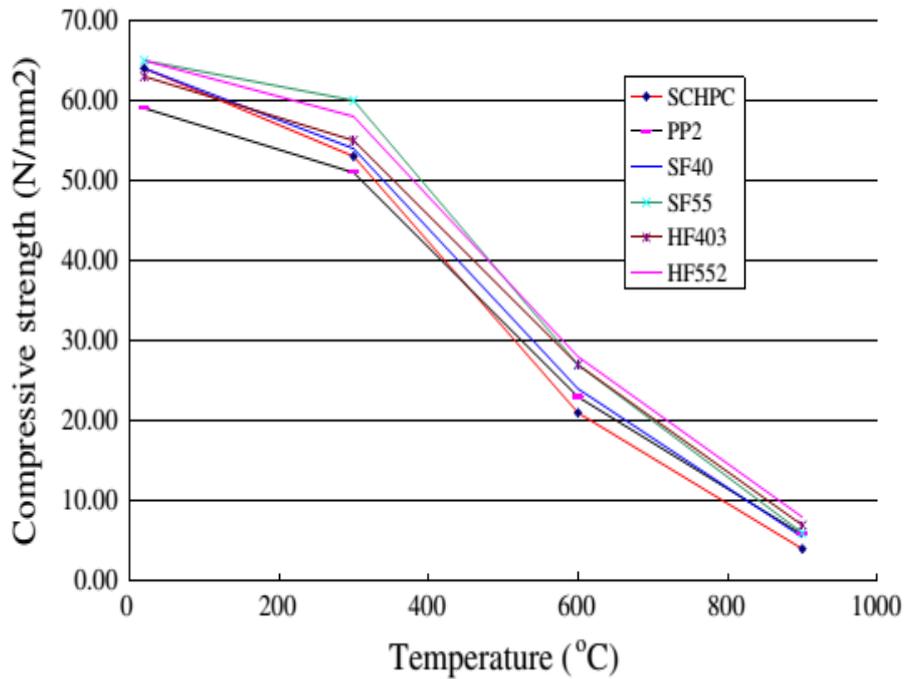
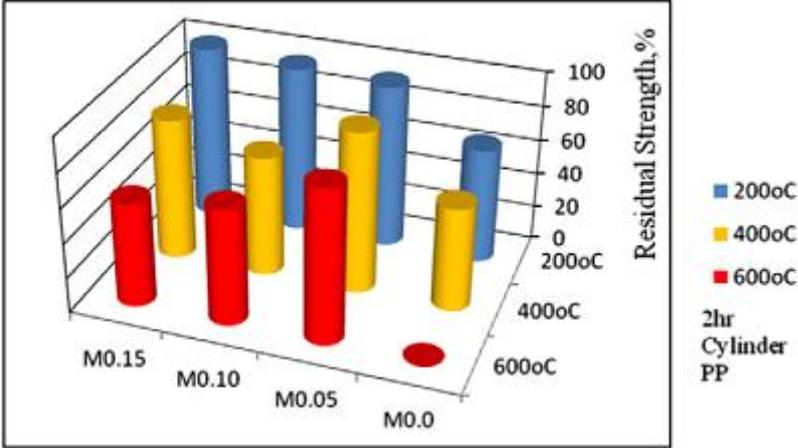
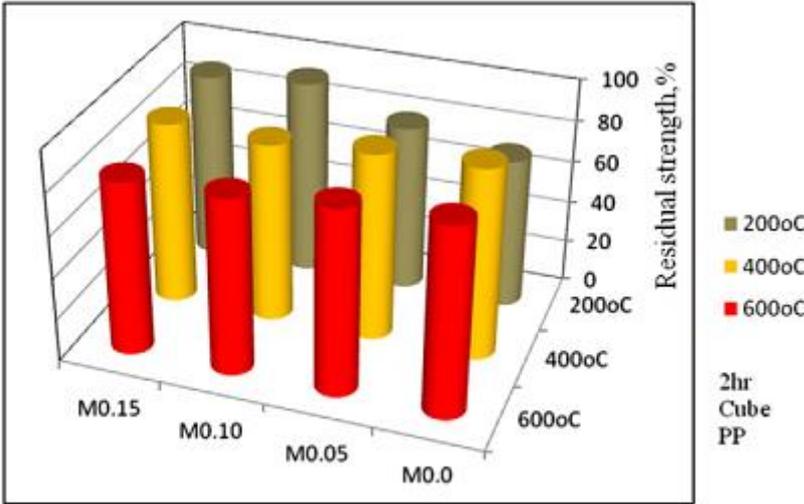


Figure II.16: comportement de béton autoplaçant renforcé par fibres métalliques et d'acier à haute température [27]

Arabi N.S. Al Qadi et al [28] ont étudié l'influence de la teneur des fibres de polypropylène sur le comportement d'un BAP soumis à une haute température. Différents corps d'épreuves ont été utilisés, des éprouvettes cylindriques et cubiques ont été exposés à une température élevée de 200 à 600°C pour une durée de 2 et 4 h. Leurs résultats montrent que la présence des fibres de Polypropylène avec différentes teneurs pour les éprouvettes cylindriques n'affecte pas la résistance résiduelle à la compression à 200, et 400 ° C, alors qu'il y a une augmentation considérable de la résistance résiduelle à la compression des bétons après une exposition à une température de 600 ° C. Pour les éprouvettes cubiques l'ajout des fibres de différents dosages n'affecte pas la résistance résiduelle à la compression à 200 et 400 ° C tandis qu'il y a une augmentation de ceci après une exposition à 600°C.

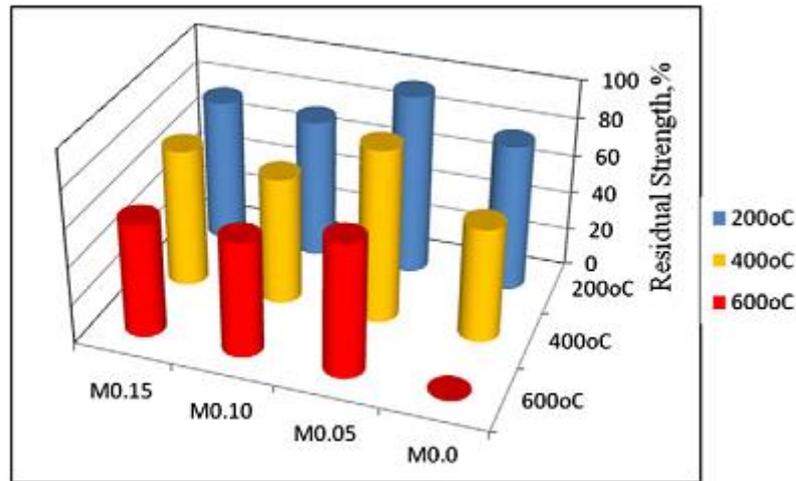


(a) Cylinder

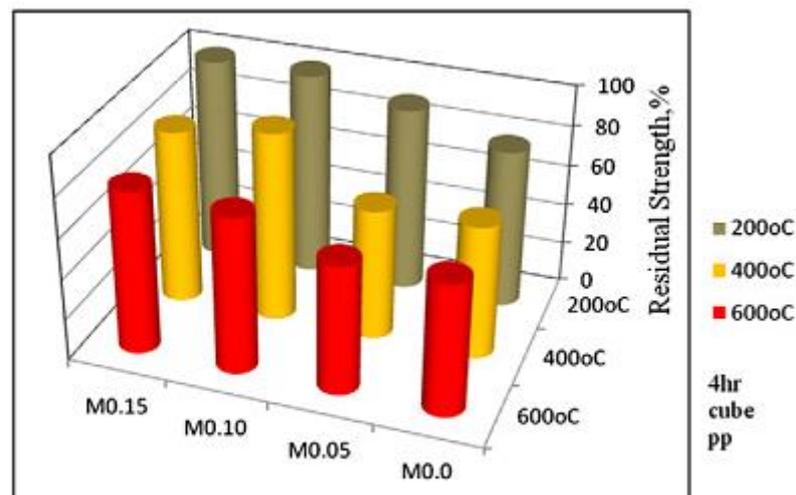


(b) Cube

Figure II.17 : la résistance résiduelle relative de BAP après 2 heures [28]



(a) Cylinder



(b) Cube

Figure II.18: la résistance résiduelle relative de BAP après 4 heures [28]

Après, ils ont fait une comparaison entre les échantillons cubiques et cylindriques. Les résultats montrent que ces dernières présentent une meilleure résistance résiduelle à la compression par rapport aux éprouvettes cubiques. Ils ont expliqué cela que le transfert de la chaleur de la température pour les éprouvettes cylindriques est facile, et il y a une répartition symétrique de la chaleur par rapport aux échantillons cubiques. Ils ont trouvé qu'il y a une différence de 25% dans la résistance à la compression entre les spécimens cubiques et cylindriques. Ils ont conseillé d'éviter les formes symétriques dans les bâtiments en utilisant des colonnes de forme cubique que cylindrique.

**K.K. Sideris et al [29]** ont été étudié l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés des bétons vibrés et des BAP de différentes classes de résistance quand ils sont exposés à des températures élevées de 300 et 600°C. Un total de six différents BAP et 02 bétons vibrés ont été produits. Les classes de résistance des mélanges étaient C25/30 et C30/37. Les spécimens produits ont été placés à l'âge de 120 jours dans un four électrique. Les propriétés mesurées après exposition à la chaleur sont la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, l'absorption d'eau par capillarité et la vitesse d'impulsion ultrasonique.

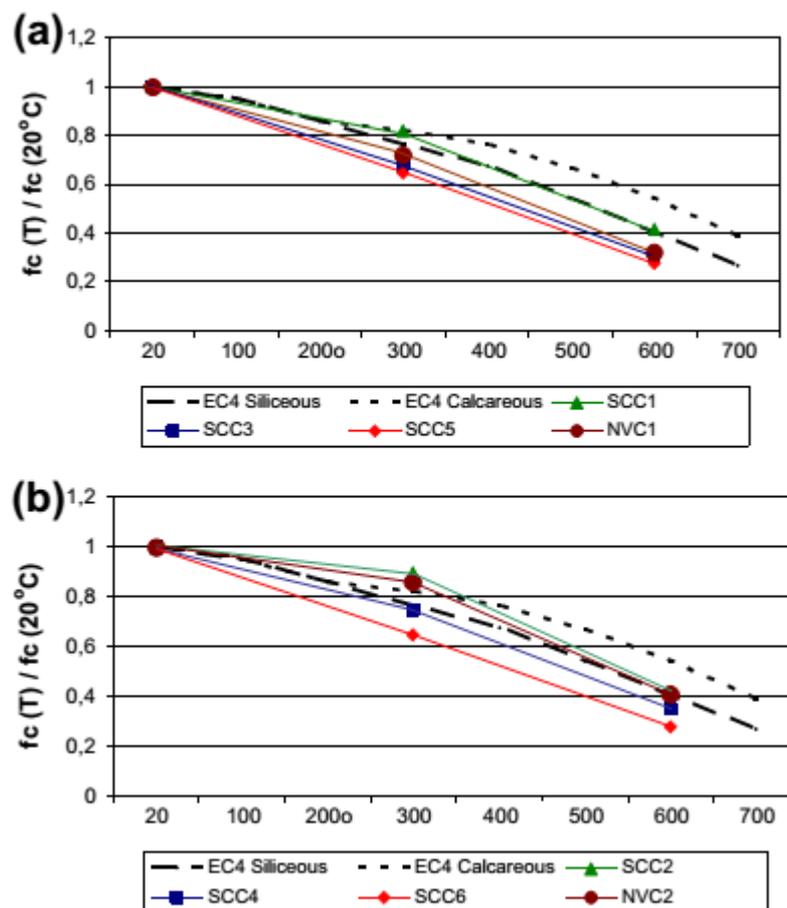


Figure II.19: comparaison entre la résistance de compression résiduelle d'un BAP et un béton ordinaire vibré[29]

L'influence des fibres de polypropylène sur la résistance de compression résiduelle est illustrée sur la Fig. II.19. Comme il a été mentionné dans la figure, des fibres de polypropylène fondent à 160-168°C et qui sont à l'état liquide, passent à travers les pores qui les entourent. Ce mouvement va briser le lien entre les produits hydratés. Avec une température plus élevée, les fibres fondues vont absorber plus d'énergie et se vaporiser. Ainsi les restes de fibres (les canaux) et le chemin d'écoulement sont reliés l'un à l'autre pour former un réseau de pores plus conjonctif

à l'aide de la pression interne de vapeur. La formation de pores supplémentaires ont conduit à une réduction rapide de la résistance résiduelle en particulier dans la plage de température de 100-300 ° C mais aucun écaillage n'a été observé à une température testée. Tous les mélanges de BAP produits avec des fibres de polypropylène réalisent une baisse plus forte de leur résistance à la compression résiduelle après traitement de différentes températures. Il convient également de noter que la longueur des fibres - 6 ou 12 mm - n'a pas influé sur les résultats puisque tous les mélanges du BAP produite avec des fibres de polypropylène présentent la même tendance.

Les mélanges de béton étudiés dans cette étude étaient de catégories différentes de perméabilité, car ils ont été produits avec des teneurs en ciment différentes et des E/C. L'absorption d'eau capillaire est présentée pour tous les mélanges dans la figure II.20.

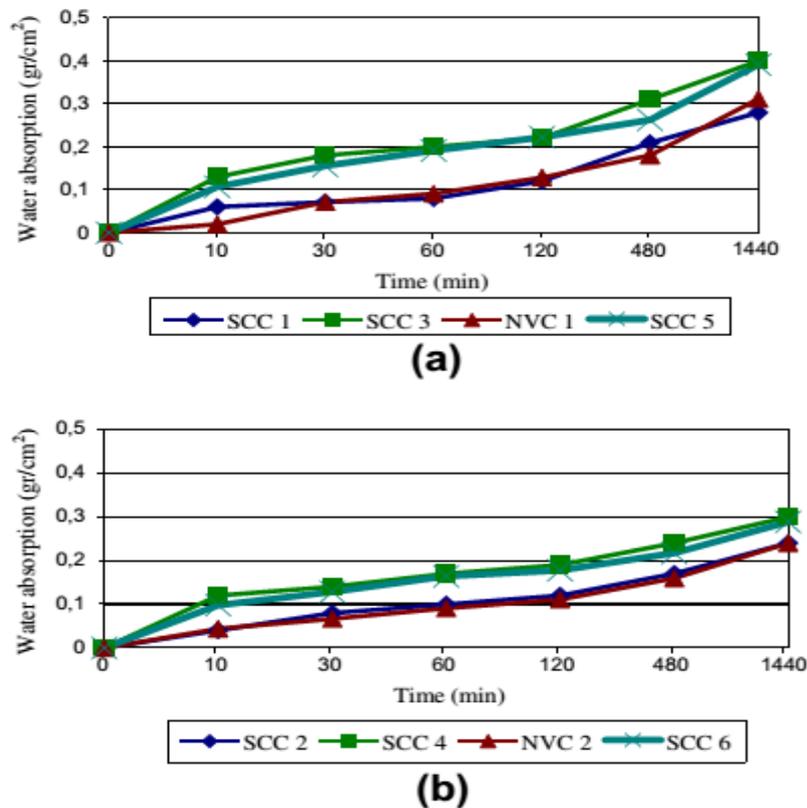


Figure II.20: Absorption d'eau capillaire des BAP et béton ordinaire [29]

Les BAP et béton ordinaire vibré de classe inférieure C25/30 ont été produits avec une valeur élevée de rapport E/C, ce qui a entraîné de grandes valeurs d'absorption d'eau, et pour cette raison l'effritement était faible, mais seulement quelques spécimens cylindriques de BV ont été détruits.

Au contraire, l'écaillage explosif s'est produit à la fois pour le BAP et de BV de la plus grande classe de résistance sans fibres. Les mélanges réalisés avec de polypropylène de 6 mm et 12 mm ont été caractérisés par une perméabilité plus élevée à l'eau, due probablement à une moindre efficace des BAP sans fibre. Cette porosité supplémentaire, en combinaison avec la voie formée après fibres obtenues par fusion, a permis d'améliorer l'effritement (comportement), mais il était également responsable de la moindre résistance résiduelle mesurée.

Ils ont conclu que les BAP testés dans la présente étude avaient une tendance explosive effritement presque semblable à celui du BV de la même classe de résistance.

L'influence de l'ajout de fibres de renforcement sur le comportement du béton à hautes températures a été double. D'une part, ils ont réduit les valeurs de l'étalement et L-box de BAP ainsi le compactage obtenu plus difficile. La porosité totale a été légèrement augmentée, ce qui a conduit à une perméabilité accrue, ce qui réduit le risque de l'éclatement explosif. Sur les fibres de polypropylène fondent à des températures supérieures à 160 ° C en créant de cette façon une voie supplémentaire à l'intérieur de la structure en béton.

## **II.5.Conclusion**

Dans le but de diminuer l'impact de l'industrie des composites sur l'environnement, plusieurs recherches sont menées afin de valoriser les fibres végétales comme renforcement des matrices cimentaires ou polymères. A partir de la littérature ils ont prouvé que non seulement les fibres végétales sont moins chères, écologiques, inoffensifs sur la santé et plus légères, mais, elles ont aussi des propriétés mécaniques très intéressantes. C'est d'ailleurs, ce qui explique leur substitution progressif aux fibres synthétiques.

En revanche, plusieurs facteurs peuvent influencer les caractéristiques des fibres végétales. En effet, il a été constaté que pour une même fibre une dispersion non seulement dans ses dimensions, mais aussi dans ses propriétés mécaniques physiques et thermiques. Cette variation est due principalement à l'origine de la plante, sa variété, les conditions de sa croissance et la saison de sa récolte.

Dans la présente étude nous essayons de valoriser les fibres végétales (chanvre et chènevottes) dans le domaine des bétons fluides et d'évaluer leurs comportements dans des milieux agressifs en les comparant aux fibres synthétiques (Polypropylène). Pour faciliter la compréhension de ces phénomènes et d'expliquer les mécanismes mis en jeu, nous présenterons dans le troisième chapitre les notions de base sur la durabilité dans un milieu agressif.

**CHAPITRE III :**  
***GENERALITES SUR L'ATTAQUE SULFATIQUE***

## III.GENERALITES SUR L'ATTAQUE SULFATIQUE

### III.1.Introduction

L'existence d'un grand nombre d'ions nocifs dans l'eau de mer ou dans les eaux souterraines, tels que l'ion chlore et les ions de sulfates radicaux, vont menacer la durabilité des structures en béton.

L'attaque des sulfates externes est un phénomène physico-chimique plus complexe dépendant de nombreux paramètres chimiques (type de sulfate, type de ciment, la formulation du béton, classe de l'exposition...) et physiques (augmentation de la porosité, expansion, perméabilité...).

De nombreux ouvrages de génie civil tels que les quais, les ponts, les fondations et les tuyaux en béton, exposés à l'environnement du sulfate durant toutes leurs durées de vie [30].

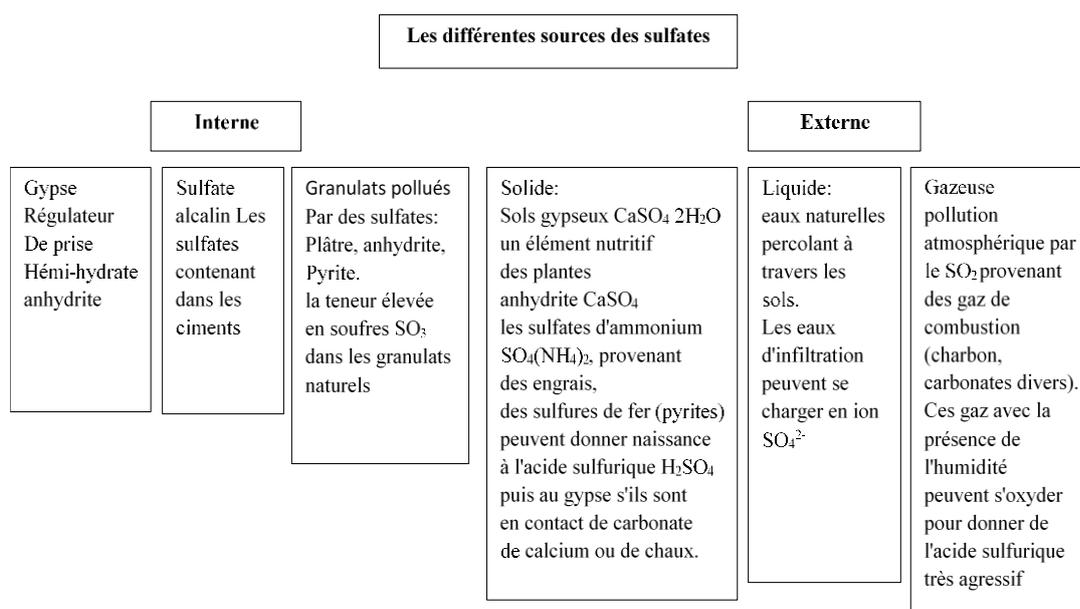
Actuellement, il y a des préoccupations croissantes suscitées par les changements de la résistance du béton sous exposition à long terme aux environnements contenant des sulfates[31], [32].

Le mécanisme de RES c'est un déplacement des ions de sulfate dans les matériaux cimentaires à travers les pores au moyen de différents mécanismes de transport, la réaction entre ces ions avec des espèces ioniques de la solution interstitielle (la phase AFM, les phases hydrogrenat, non hydratées, les phases d'alumine et C-H ) peut conduire à la précipitation de la formation de quelque particules minérales, comme le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), ettringite ( $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6,12\text{H}_2\text{O}]_2 \cdot (\text{SO}_4)_{3,2}\text{H}_2\text{O}$ ) ou thaumasite ( $\text{Ca}_3[\text{Si}(\text{OH})_6,12\text{H}_2\text{O}] \cdot (\text{CO}_3) \cdot \text{SO}_4$ ) [33]. En raison de la précipitation de ces minéraux, la structure de la pâte durcie peut se détériorer en raison de l'excès de la contrainte au sein du matériau, produisant une expansion, une perte de la résistance et l'éclatement [34], [35].

Il y a plusieurs travaux sur l'étude de la détérioration du béton vibré dans un environnement du sulfate. Mais peu d'informations sur le comportement du béton autoplaçant dans le milieu sulfatique [36].

### III.2. Origine des sulfates

Les sulfates sont trouvés dans une variété de sources, les eaux souterraines, l'argile, l'eau de mer, des matières organiques dans les marais, des fosses minières, et les tuyaux d'égout [37]. On peut classer les origines de sulfates comme externe et interne (Figure III.1):



*Figure III.1 : origine des sulfates*

### III.3. Mécanismes généraux de dégradation par les sulfates externes

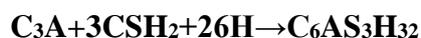
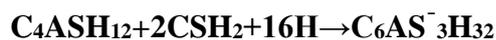
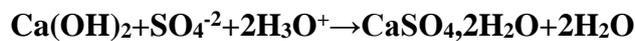
L'attaque des sulfates a été traditionnellement étudiée par deux principes: le premier c'est la formation de l'ettringite et le deuxième c'est la formation de gypse [30].

Concernant la formation de l'ettringite dans une solution de sulfate de sodium suit un processus en trois étapes respectivement, qui sont la période de pénétration, la durée de l'amélioration de la résistance et la période de macro-fissure. Donc la fissuration des matériaux de béton est principalement attribuable à l'effet de l'ettringite. Mais les formations de gypse se sont déroulées en deux phases, la phase de latence et la période d'accélération. La formation de gypse comprenant la formation de l'ettringite est relativement due à la dilatation linéaire des échantillons cimentaires.

Il est évident que l'attaque des sulfates peut se produire que lorsque les sulfates sont présents en contact avec le béton. Mais quelle est la quantité des sulfates nécessaire pouvant réagir avec les composants du ciment provoquant des dommages au béton ?[34].

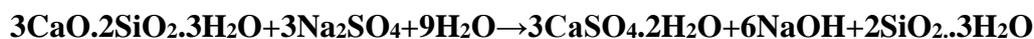
Kamile Tosun et al (2009) [36] ont montré que la teneur du sulfate élevée modifié le mécanisme des réactions des sulfates et la formation de produits cimentaire.

E. Rozière et al (2009)[38] ont supposé que les ions de sulfate sont susceptibles de réagir avec la portlandite et des produits d'hydratation riche de C<sub>3</sub>A, selon les équations suivantes ci-dessous. Ils ont noté que le gypse peut effectivement jouer un rôle important dans le mécanisme de dégradation à des concentrations élevées du sulfate et aussi la formation d'ettringite dans tous les échantillons d'essais.



Selon le mécanisme suivant :

Le mécanisme est basé sur la lixiviation des ions calcium de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>, et des C-S-H. Ce mécanisme montre les réactions concernant les sulfates de sodium voir les équations suivantes:



A partir de ces équations l'auteur a remarqué que les deux réactions libéré des ions **Ca<sup>+2</sup>** et du gypse **CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O** qui se précipitent si le produit des ions [Ca<sup>+2</sup>]. [SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>] excède le produit de solubilité du composé.

Quelques travaux antérieurs sur les processus d'attaque sulfatique externe :

E.F.Irassar et al (00)[39] ont montré que le CH réagit avec les ions de sulfate pour former le gypse. En complément, certains auteurs suggèrent que la consommation de  $\text{Ca}^{2+}$  produit par la dernière réaction peut conduire à la décomposition de C-S-H. Pour les mortiers contenant une teneur plus élevée de  $\text{C}_3\text{S}$  le mécanisme de dégradation est associé à la formation d'ettringite fournissant des hydrates de ferro-alumineux.

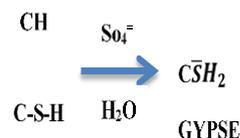
Kamile Tosun et al (2012) [32] ont noté que le gypse peut être formé à partir de la réaction entre les ions de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et la portlandite et la transformation du gypse à l'ettringite en présence de quantités élevées de monosulfate est possible selon l'équation suivante :



Kamile Tosun et al (2009) [36], ont mentionné que la différence entre les mécanismes de la réaction de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{MgSO}_4$  attaquant le mortier du ciment calcaire dépend fortement de la variation du pH des solutions de sulfate.

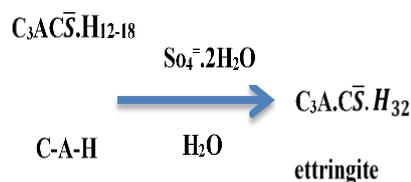
M. Collepardi (2003)[35] a résumé la manifestation spécifique de la RSE qui dépend de trois procédés chimiques prédominants, qui sont les suivants:

- i) attaque des sulfates sur CH et C-S-H pour former le gypse:



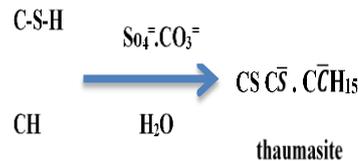
Ce phénomène peut entraîner l'expansion, l'écaillage, la perte de la solidité et l'adhérence de la pâte du ciment à cause de la décalcification des C-S-H. Ce processus peut se produire avec tous les sels du sulfate contenant ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ) à l'exception du sulfate de calcium.

- ii) attaque des sulfates sur les hydrates d'aluminate de calcium (C-A-H) et monosulfate hydraté ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12-18}$ ) pour former l'ettringite:



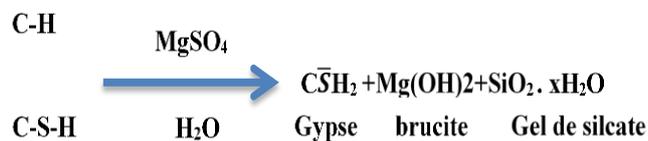
Ce processus est principalement responsable de la fissuration, en raison d'expansion produit par la formation d'ettringite. Ce processus peut se produire avec tous les sels y compris les sulfates de calcium qui agissent directement sur le C-A-H et / ou hydrate monosulfate.

- iii) Les Sulfates attaquent le C-S-H et CH en présence d'ions carbonate pour former le thaumasite:



La formation de thaumasite est accompagnée par la perte de la résistance d'adhérence, car une partie importante de C-S-H peut être détruite selon la réaction ci-dessus. Ce processus peut se produire avec tous les types de sels de sulfate et elle s'est favorisée par une atmosphère humide et basse température (<10 ° C).

- iv) Attaques des sulfates sur les CSH par le sulfate de magnésium (MgSO<sub>4</sub>), qui n'est pas directement liée à la formation de l'ettringite:



Même dans ce type d'attaque, sans formation d'ettringite, il y a une perte de force et de l'adhérence de la pâte du ciment due à la décalcification des CSH comme dans le cas précédent.

### III.4. Les conditions de l'attaque sulfatique externe

Les attaques des sulfates dans le béton sont plus susceptibles de se produire si les conditions suivantes sont réunies simultanément:

- l'environnement du sulfate (de l'eau ou le sol) pénétrant dans les structures en béton,
- la perméabilité des bétons,

c) Environnement humide qui facilite la diffusion de  $\text{SO}_4^{-2}$  dans la phase aqueuse des pores capillaires.

Dans la plupart des cas, une attaque par des sulfates dans le béton est produite par des sources extérieures, par exemple, les eaux souterraines et dans certains types d'argiles[35].

### **III.5.Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements sulfatiques: (Les paramètres influents)**

Le mécanisme d'attaque sulfatique est complexe car il dépend de divers facteurs physico-chimiques tels que le type de ciment, le rapport Eau/Ciment, la perméabilité, le type de cation associé avec l'anion sulfate, la concentration de sulfate, la durée d'exposition et de l'environnement.[30],[31],[36],[39]ont ajouté aussi que parmi les facteurs: la baisse de la température, la présence au moins 10% à 35% de  $\text{CaCO}_3$  en masse du ciment.

N.N. Naik et al (2006) [40] ont montré que parmi les facteurs qui influent sur la résistance des bétons aux sulfates, la composition du ciment et le rapport E/C, qui sont deux facteurs clés qui influent sur la résistance des bétons aux sulfates.

#### **III.5.1.Influence du cation associé au sulfate**

Le degré d'agressivité de ce phénomène dépend fortement de types de sulfates.Adam Neville (2004) [34] a noté que le sulfate de sodium ou de potassium sont beaucoup plus solubles,et entraînant des dégradations plus rapides. Ils réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former le gypse. Le gypse réagit avec  $\text{C}_3\text{A}$  généralement par l'intermédiaire de la formation de monosulfoaluminate, pour former l'ettringite.

Kamile Tosun et al (2012)[32]ont démontré que l'augmentation de l'expansion a été plus importante dans les échantillons exposés à la solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  qu'à la solution  $\text{MgSO}_4$ . Mais la résistance des éprouvettes à la compression a diminué plus significativement dans la solution du sulfate de magnésium qu'à la solution du sulfate de sodium.

#### **III.5.2.Ciment**

La performance des ciments aux attaques sulfatiques dépend de type et du niveau de remplacement des additions minérales et sur la composition du clinker, en particulier la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  et de  $\text{C}_3\text{S}$  [39].

L.Orejarena et al [41]a mentionné que la teneur en liant environ de 4,5% montre une bonne résistance des échantillons exposant aux attaques sulfatiques. Une forte proportion de ciment ne va pas garantir les meilleures performances.

N.N. Naik,et al(2006)[40] ont trouvé que le type de ciment I et V (la norme ASTM),est la principale cause de la variation des produits d'hydratation qui sont probablement responsables sur les changements de la dilatation des mortiers.

L'analyse microstructurale a révélé bien aussi l'effet important de la composition du ciment sur la résistance aux RSE. Le ciment de type V donne une plus grande résistance que celui de type I, à cause de la teneur plus élevé en  $C_3A$  respectivement (9,9% contre 3,3%) qui va influencer sur la quantité de l'ettringite et du monosulfate formé initialement lors de l'hydratation [40].

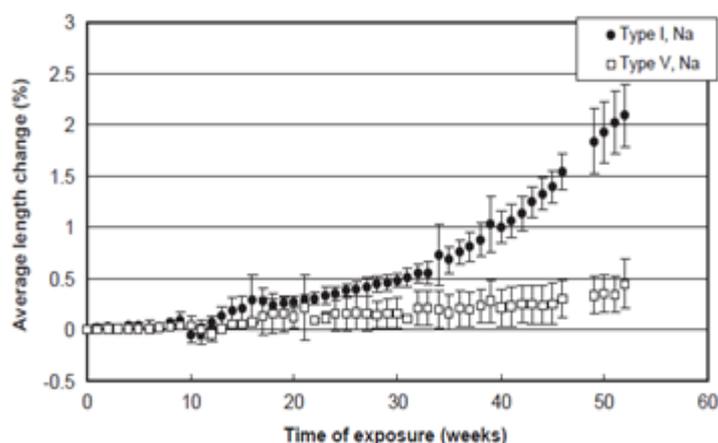


Figure III.2 : l'influence de la composition du ciment sur l'expansion des mortiers soumis aux attaques sulfatiques externes[40].

E.F. Irassar et al [39] ont montré bien l'effet de la composition du ciment aux attaques sulfatiques surtout la présence de  $C_3S$ ,  $C_3A$  et les additions minérales. Ils ont constaté pendant la durée du test que l'expansion à 360 jours est dix fois pour les ciments avec une teneur très élevé de  $C_3S$  par rapport à celui avec une teneur plus basse de  $C_3S$ .

Ils ont conclu que les mortiers avec un faible  $C_3S$  ont un excellent comportement dans l'environnement sulfatique en fonction de leurs faibles dilatations et la rétention élevée de la résistance à la flexion et à la compression. Les auteurs notent que la grande expansion du ciment avec une teneur élevée de  $C_3S$  peut être attribuée à la formation de gypse située à l'interface pâte/granulat qui est considérée comme un stade précoce de l'attaque sulfatique.

### III.5.3. Le rapport E/C

E. Rozière et al(2009) [38] ont montré que les mortiers qui sont fabriqués avec un rapport Eau / Liant faible (0,35) ne montrent pas une forte expansion. Les auteurs résultent que la réduction du rapport Eau / Liant améliore la résistance aux agressions sulfatiques.

E.F. Irassar et al [39] ont démontré que les dommages superficiels des bétons aux attaques sulfatiques sont diminués si le rapport E/C et la teneur en  $C_3A$  sont faibles.

N.N. Naik, et al(2006)[40] ont fait une étude sur les pates de ciment et les mortiers exposant à la solution du sulfate de sodium. Ils ont constaté que l'expansion progresse plus rapidement dans les échantillons avec E / C égal à 0,435, que ceux avec E / C égale à 0,485.

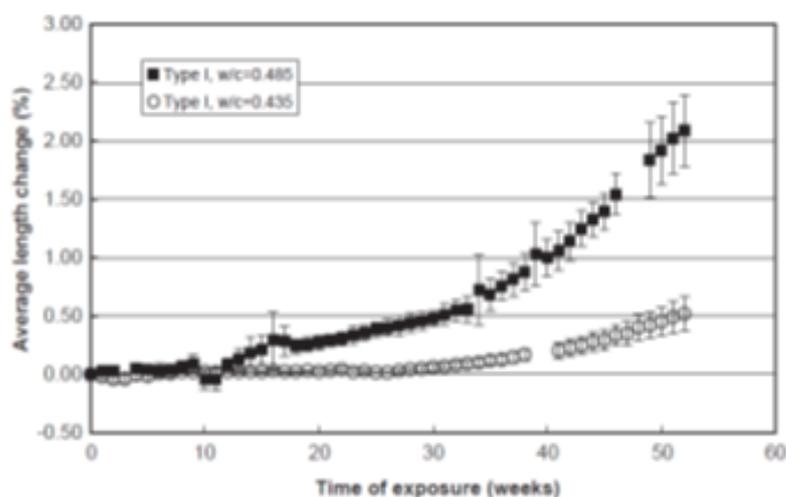


Figure II.3 : l'influence de rapport E/C sur l'expansion des mortiers sous attaques des sulfates de sodium [40]

### II.5.4. Les additions

Les cendres volantes, les laitiers, les pouzzolanes naturelles ou les fumées de silice sont des ajouts actifs dans les bétons.

E.F. Irassar et al [39] ont montré que tous les ciments contenant des pouzzolanes naturelles semblent une réduction notable de l'expansion à tous les âges du test, le remplacement de 20% de la pouzzolane avec des ciments faible de  $C_3S$ , réduit la dilatation. Alors que le taux de substitution 40% donne une contraction de 0,020% à la fin de l'essai. La résistance à la flexion augmente jusqu'à 90 jours, puis elle reste sans changement.

Ces dernières années, l'emploi des ciments avec des calcaires gagne en popularité en raison de leur technique, économique, et les avantages écologiques. Toutefois, la substitution calcaire affecte de manière significative les propriétés physiques et mécaniques des ciments composés.[32],[39].

E.F. Irassar et al [39] ont noté que l'incorporation d'une grande quantité de filler calcaire dans les matériaux cimentaires pourrait affecter leurs durabilité, en particulier, la pénétration des chlorures, la carbonatation, la résistance aux sulfates et résistance au feu. En ce qui concerne l'attaque des sulfates externes, les matériaux cimentaires avec fillers calcaires sont plus sensibles à la formation thaumasite.

Kamile Tosun et al (2009)[36] ont montré que le taux de remplacement du calcaire dans le ciment à basse température nuire à la résistance aux sulfates des mortiers de ciment. En outre, les clinkers avec un rapport peut élevé de  $C_3S/C_2S$  ont été trouvés être plus sujettes aux attaques des sulfates en présence de grandes quantités de calcaire. Les études DRX et MEB ont révélé que, l'ettringite est le produit principal de la détérioration des échantillons exposés à  $Na_2SO_4$ , le gypse et la formation thaumasite sont les produits dominants de la détérioration dans le cas de l'attaque  $MgSO_4$ .

M. Katsioti et al.(2011) [42] ont étudié les mortiers avec des ciments blancs contenant 15% ou 25% de calcaire sous l'attaque des sulfates externes. Les mortiers ont été immergés à  $50^\circ C$  pendant 180 jours dans deux solutions  $Ca(OH)_2$  et 5%  $Na_2SO_4$ . Les résultats ont montré que la quantité d'ettringite est proportionnelle à la teneur en  $C_3A$  du ciment. D'autre part la résistance à la compression des mortiers est plus faible que le cas de l'attaque des sulfates externes. Les ciments avec le calcaire subissent une bonne résistance à l'attaque des sulfates.

### **III.6.L'attaque sulfatique externe aux bétons autoplaçants**

Il y a peu de renseignements sur la résistance des BAP aux attaques des sulfates. Des études antérieures sur l'attaque des sulfates externe de BAP, utilisant des essais d'immersion classiques, qui ne rendent pas compte de service potentiel dans des conditions comme le mouillage - séchage et cycles d'immersion partielle [43].

M.T. Bassuoni et al [43] ont fait différents types d'exposition des BAP aux attaques des sulfates : une exposition par immersion totale, une exposition de mouillage/séchage et une exposition par immersion partielle. Jusqu'à 24 mois d'exposition, les résultats montrent que tous

les échantillons des BAP soumis à une immersion totale continue dans la solution de 5% du sulfate de sodium n'ont pas montré des dommages visuels distinctifs.

Kiachehr Behfarnia et al (13) [44], ont étudié les effets de différents liants pouzzolaniques tels que la fumée de silice, zéolite metakaoline sur la durabilité des bétons autoplacants dans l'environnement du sulfate de magnésium. La variation de la résistance à la compression, la perte en poids et les dimensions des éprouvettes de béton ont été mesurées après une immersion de 6 à 9 mois dans 5% et 10% de solutions de sulfate de magnésium. Les auteurs introduisent une étude sur l'effet des fibres de polypropylène ainsi que les liants pouzzolaniques sur la durabilité du BAP. Les résultats ont montré que le metakaoline et le zéolithe ont des effets meilleurs que la fumée de silice sur la durabilité du BAP à l'attaque du sulfate de magnésium à cause de la formation de M-S-H non adhérente, dans ce genre de bétons. Les fibres de polypropylène réduisent la perte de masse dans les échantillons, mais elles n'ont pas beaucoup d'influence sur l'expansion du volume des échantillons.

Bertil Persson(2003)[45], a présenté une étude expérimentale sur la résistance aux sulfates de bétons autoplacants, a cet effet, plus de 40 cylindres de béton ont été soumis à une solution de sulfate de sodium, l'eau de mer et l'eau distillée pendant 900 jours. La fréquence fondamentale interne (FFI) a été mesurée. Une comparaison a été faite avec les propriétés correspondantes de béton vibré. Les résultats montrent qu'il y a une grande perte de masse du BAP que celle de BV probablement dû à la teneur en filler calcaire dans le BAP. Après le durcissement dans l'eau de mer ou distillée, pas de différence de poids entre ces types de cure n'a été observée. L'auteur a conclu que si la teneur en sulfates dans les eaux souterraines n'est pas connue, il n'est pas approprié d'utiliser les BAP avec de grandes quantités de poudre de calcaire.

### **III.7.Conclusion**

Les BAP sont de plus en plus utilisés dans tous les éléments de construction et ouvrages de génie civil tels que les infrastructures, et les planchers industriels qui sont régulièrement soumis à des conditions environnementales agressives. En raison de sa forte présence dans les sols et les eaux souterraines, l'attaque de sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) peut être classée comme l'une des menaces naturelles agressives pour les structures en béton. Les aluminates de calcium et Portlandite sont les produits d'hydratation les plus sensibles à l'attaque sulfate de sodium. En présence de sulfate de sodium, l'hydroxyde de calcium réagit pour former du gypse. Ce dernier participe à la formation d'ettringite secondaire de C3A résiduelle ou anhydre aluminates hydrate.

La détérioration du béton en raison de sulfate de sodium est bien connue dans le béton. Toutefois, en raison des différences dans la conception de mélange, en particulier les grandes quantités de matériaux, le volume et la nature des ajouts minéraux peuvent influencer positivement ou négativement sur la résistance des BAP à l'attaque des sulfates de sodium. A partir de cette étude bibliographique on peut conclure qu'il existe de nombreuses études sur la durabilité du béton ordinaire exposé à l'attaque de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cependant, il existe peu d'informations sur le comportement des BAP sous attaque  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

On sait que la Fibre de polypropylène est introduit dans le mélange pour réduire la fragilité de la matrice ce qui réduit la sensibilité à la fissuration d'un béton. Il est également signalé que la fibre de polypropylène est efficace pour résister à la formation de fissures causées par le retrait de séchage.

L'inclusion des fibres de polypropylène dans le béton présente une excellente durabilité lors de l'exposition aux attaques sulfatiques. Mais il y a très peu d'informations sur la durabilité des bétons autoplacants renforcés par des fibres végétales.

S'inspirant des travaux antérieurs les plus récents dans le domaine d'intérêt, une enquête sur l'influence de deux modes de renforcement (fibres végétales et fibres synthétiques) sur les altérations des propriétés des bétons autoplacants soumis à l'attaque du sulfatique a été retenue pour lancer une vaste investigation expérimentale exploratoire.

Après avoir effectué cette synthèse bibliographique sur les deux modes de renforcements, par analogie aux travaux antérieurs et par quelques essais préliminaires, une classification des facteurs influents a été dressée (paramètres de composition, paramètres d'environnement, paramètres de sollicitations et de chargement...) s'appuyant sur les récentes études.

Le choix des réponses retenues est basé sur des critères objectifs d'appréciation et de quantification des phénomènes étudiés.

Une démarche systématique a été retenue pour répondre aux objectifs ainsi tracés.

- Identification et caractérisation des matériaux de base
- Formulation des mélanges élaborés
- Qualification des mélanges d'autoplacants
- Performances mécaniques
- Comportement différé sans charge
- Comportement thermomécanique (60 C° à 600C°)
- Durabilité sous attaque sulfatique.

**CHAPITRE IV :**  
***CARACTERISATION DES MATERIAUX TESTES***  
***ET PLAN EXPERIMENTAL***

## **IV. CARACTERISATION DES MATERIAUX TESTES ET PLAN EXPERIMENTAL**

### **IV.1. Introduction**

L'association des fibres végétales dans une matrice autoplaçante comme un renfort est une initiative entreprenante qui permet de mettre en valeur des matériaux naturels, renouvelables et à faibles impacts économique et écologique.

L'utilisation des renforts non conventionnels (fibres végétales) pour l'élaboration de notre matériau qui est constitué d'une matrice cimentaire (autoplaçante) plus un renfort (fibres végétales) impose la connaissance des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques de ces composants.

En ce qui concerne notre étude, préoccupé de vulgariser l'emploi des bétons autoplaçants sous conditions locales, il apparaissait nécessaire de considérer des BAP renforcés de fibres végétales pour réaliser le cumul des avantages offerts par cette association. Nous avons cependant également mis en œuvre des BAP renforcés de fibres synthétiques pour servir d'éléments de comparaison destinés à bien faire ressortir les spécificités du comportement BAPF sous milieu agressif.

Pour cela tous les essais menés au cours de cette étude, ont été effectués sur béton et réalisés au sein du laboratoire « Matériaux et durabilité des constructions ». Les essais ont été fait conformément aux normes d'AFNOR(et leurs équivalentes des normes Algériennes NA).

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation du programme expérimental et matériaux testés, ainsi que les méthodes d'essais utilisés. Les conditions de fabrication et de conservation des corps d'épreuves y sont aussi signalées.

### **IV.2. Programme Expérimental**

En effet, notre recherche a pour objet l'étude de l'influence des fibres végétales sur le comportement des BAP sous environnement agressif (attaque sulfatique).

Dans le cadre de ce travail trois programmes expérimentaux ont été réalisés:

Dans le premier programme, en premier lieu, Il s'agit de formuler un béton autoplacant témoin (sans fibres). En deuxième lieu, nous avons choisi une formulation optimisée par l'incorporation des fibres, puis étudier l'effet de ces fibres sur les caractéristiques des BAP à l'état frais et à l'état durci ;

Dans le deuxième programme expérimental, nous avons étudié l'effet de ces fibres sur les variations dimensionnelles et pondérales des BAP, ainsi que le comportement des BAPF sous l'élévation de la température.

Dans le troisième programme expérimental, nous avons étudié l'effet des fibres sur le comportement des BAP sous l'attaque sulfatique.

L'organigramme suivant de la figure IV.1 rassemble les principales étapes de l'étude expérimentale.

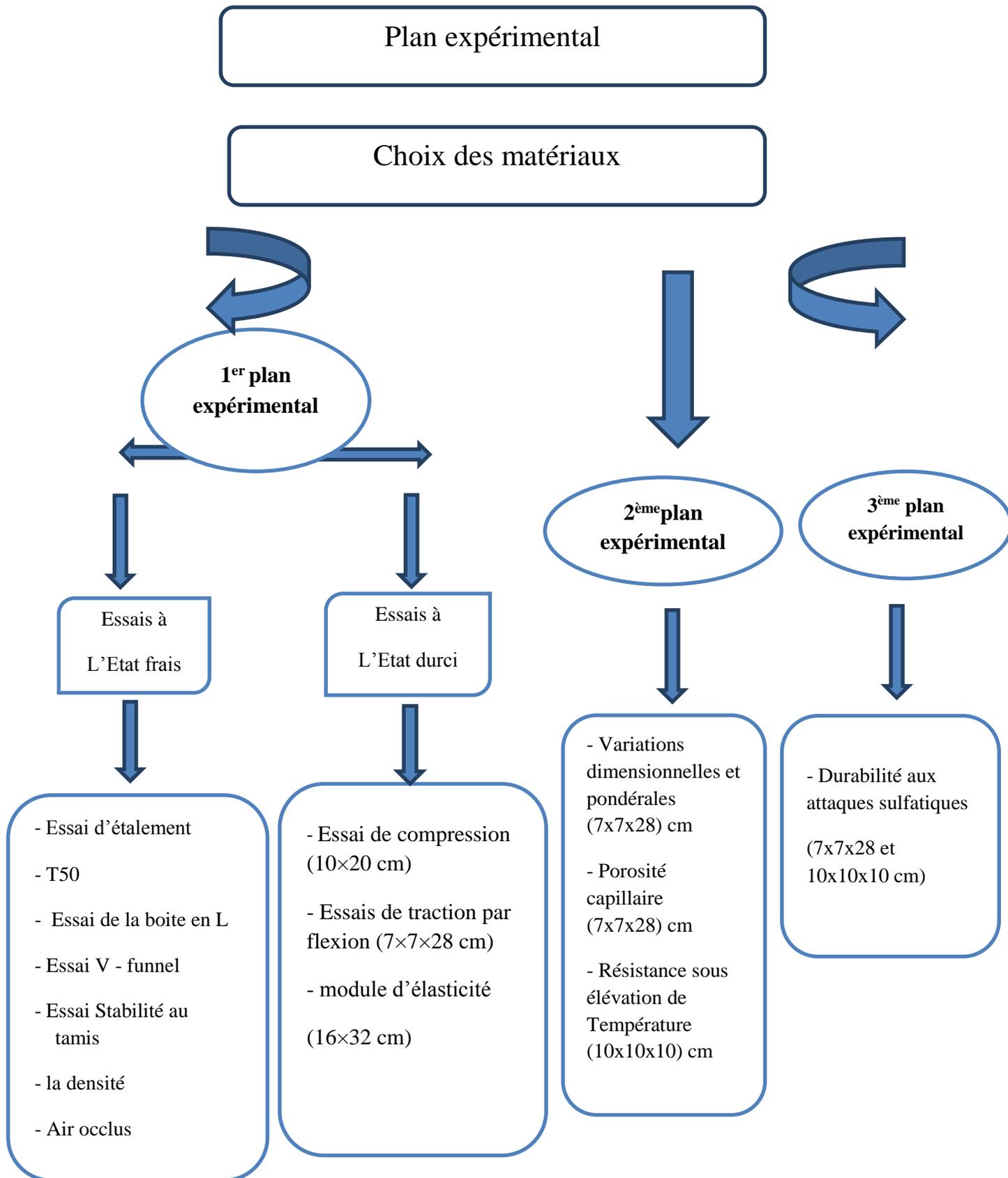


Figure IV.1. : Organigramme des essais réalisés.

Dans cette partie de la recherche, nous allons mener une étude expérimentale de la formulation des BAP selon la méthode chinoise et la méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire LCPC, afin de choisir la méthode la plus avantageuse.

Comme nous avons mentionnées au-dessus, notre but est d'étudier l'effet des fibres végétales (chanvre, chènevotte) ainsi que la fibre de polypropylène sur le comportement des BAP sous l'attaque sulfatique.

Une campagne expérimentale a été mise pour composer nos mélanges qui sont constituées d'une matrice (BAP) et un renfort (fibres).

Pour composer nos BAP fibrés on prend la composition optimale sans fibres (BAP) correspondante à la valeur de  $E/C = 0,51$ . Et on fait varier le type de fibres (chanvre, chènevotte, polypropylène). Le dosage en fibres est fixé à 0,5% par rapport à la masse du ciment, et pour une longueur égale à 30mm.

Notre but est d'incorporer des fibres dans le béton autoplacant devant obtenir des BAP qualifiés d'autoplacant selon les recommandations de l'AFGC.

La notation BAP désigne (Béton autoplaçantsans fibrés), suivi de CV quand il renforcé de fibres de chanvre, suivi de CT quand il renforcé de chènevotte et PP quand il renforcé de fibres de polypropylène.

*Tableau IV.1 : Notation des mélanges.*

Désignation	Notation
Béton autoplacant	BAP
Béton autoplacant renforcé de fibre de chanvre	BAPCV
Béton autoplacant renforcé de fibre de chènevotte	BAPCT
Béton autoplacant renforcé de fibre de polypropylène	PABPP

Après avoir formulé nos mélanges, nous devons aussi les caractériser à l'état frais par des essais normalisés (Etalement, T50, boîte en L, V - funnel, Stabilité au tamis, densité, air occlus),

Le tableau IV.2 présente les différents essais effectués.

*Tableau IV.2 : Caractérisation des mélanges à l'état frais.*

Mélanges	Mesures effectuées
BAP	- Essai d'étalement, T50
BAPCV	- Boite en L
BAPCT	- V - funnel
PABPP	- Stabilité au tamis - Densité - air occlus

A l'état durci, une caractérisation classique des mélanges sur des éprouvettes normalisées, à Cinq(05) échéances (3, 7, 14, 28 et 90 jours), le tableau IV.3 représente les différents essais.

*Tableau IV.3 : Caractérisation classique des mélanges à l'état durci.*

Désignation	BAP	BAPCV	BAPCT	PABPP
Nombre d'éprouvette	3	3	3	3
Conservation (T °C, HR %)	20 ± 2 °C			
	95 ± 5 %	95 ± 5 %	95 ± 5 %	95 ± 5 %
Age d'écrasement (jours)	3, 7, 14, 28, 90	3, 7, 14, 28, 90	3, 7, 14, 28, 90	3, 7, 14, 28, 90
Corps d'épreuve (cm)	(10 x 20)	(10 x 20)	(10 x 20)	(10 x 20)
	(7 x 7 x 28)			
Type d'essai	Compression	Compression	Compression	Compression
	Traction / flexion	Traction / flexion	Traction / flexion	Traction / flexion

Dans ce programme expérimental, trois types de moules ont été utilisés ;

- Les éprouvettes de forme cylindrique normalisées et d'élanement 2 (10x20 normes NF P18-400, NA 2600) utilisées pour la détermination des résistances à la compression.
- Les éprouvettes prismatiques normalisées (NF P 18-400, NA2600) de dimensions (7x7x28) cm pour la détermination des résistances à la flexion 3 points, mesure du retrait ainsi que la perte en poids et l'absorption capillaire et l'attaque sulfatique.
- Les éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) destinés pour les essais sous élévation de température et l'attaque sulfatique.

### IV.3: Constituants des mélanges :

#### IV.3.1. Le Ciment :

L'ensemble des essais a été réalisé avec un seul ciment, C'est un CEM I 42.5, conforme à la norme EN 197-1. Ce ciment est de type Ciment Portland Artificiel sans ajouts provenant de l'importation. Il contient au moins 95% de clinker. Le reste est composé de constituants secondaires tel que le gypse comme régulateur de prise. Les tableaux ci-dessous présentent les compositions chimiques et minéralogiques, les caractéristiques physiques, les résistances mécaniques pour formuler les différentes formulations.

Tableau IV.4 : Composition chimique du clinker.

$SiO_2$	20,14
$Al_2O_3$	3,71
$Fe_2O_3$	4,74
$CaO$	63,47
$MgO$	2,12
$SO_3$	2,67
$K_2O$	0,47
$Na_2O$	0,69
$P_2O_5$	0,06
$TiO_2$	0,21
$PAF$	1,72

Tableau IV.5 : Composition Minéralogique du clinker.

Eléments	Nom Technique	Abréviations	Teneur (%)
Silicate tricalcique	Alite	C3S	56,60
Silicate bicalcique	Bélite	C2 S	22,98
Aluminate tricalcique	Phase aluminate	C3 A	9,87
Alumino - ferrite tétracalcique	phase ferrite	C4 AF	8,25

*Tableau. IV.6. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment*

Paramètre	Valeur
Consistance normale de la pâte (%)	27
Temps de début de prise	2h 50min
Temps de fin de prise	4h :15
Densité spécifique	3.1
Finesse (cm <sup>2</sup> /g)	3300
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	> 42,5

On remarque que c'est un ciment qui répond aux exigences fixées par les normes.

### IV.3.2. Le Filler Calcaire

Le filler utilisé pour la formulation des BAP, est l'UF5, est une addition calcaire conforme à la norme NF P 18-508, fabriqué et fourni par l'entreprise nationale des granulats ENG. Les caractéristiques chimiques et physiques de ce produit sont récapitulées dans les tableaux IV.7, et IV.8 proviennent des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de L'ENG.

*Tableau. IV.7. Composition chimique du filler calcaire.*

Elément	Teneur (%)	Elément	Teneur (%)
CaCO <sub>3</sub>	98	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03
SiO <sub>2</sub>	0,04	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02
Na <sub>2</sub> O	0.05	K <sub>2</sub> O	0,02
Mgo	0,17	SO <sub>3</sub>	0,19
Perte au feu	43	PH	9

*Tableau. IV.8. Composition physique du filler calcaire*

Filler	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
UF5	2.7	0.76g/cm <sup>3</sup>	95.19 %	25 %	0.02%

### IV.3.3. Les granulats:

Les granulats constituent une matière première indispensable au bâtiment et au génie civil. Ils forment notamment le squelette des bétons. Choisir le type de granulats à utiliser est une étape importante qui nécessite de prendre en compte, les performances attendues.

Tous les granulats utilisés dans cette étude sont des granulats calcaires concassés conformes aux normes XP P18-545 proviennent de la Carrière de Ain Abid. Trois classes de

granulats sont utilisées lors de la formulation des bétons, du sable 0/3 et des gravillons 3/8 et 8/15.

Pour pouvoir faire le bon choix des granulats, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

Les caractéristiques physiques, mécaniques et l'analyse granulométrique des granulats ont été déterminées au sein du laboratoire des travaux publics de l'EST (LTP – Est Constantine).

Les résultats de l'analyse granulométrique (normes : NA 2607, NF EN 933-1), le module de finesse du sable ainsi que le coefficient d'aplatissement (normes : NA 256, NF EN 933-3) du gravier sont rassemblés dans le tableau IV.9 et les courbes granulométriques sont représentées sur la figure IV.1.

*Tableau. IV.9. Caractéristiques géométriques des granulats*

Ouverture des tamis en millimètre	module	Granulats calcaires concassés		
		Coupures granulaires		
		0/3	3/8	8/15
0,08	20	15		
0.16	23	21		
0.25	25	31		
0.315	26	43		
0.5	28	60		
0.63	29	82		
0.8	30	100		
1.25	32		00	
2.5	35		01	
4	37		17	
5	38		67	00
6.3	39		100	01
8	40			03
10	41			13
12.5	42			48
16	43			100
20	44			
25	45			
Module de finesse		2.56	/	/
Coefficient d'aplatissement		/	15%	11%

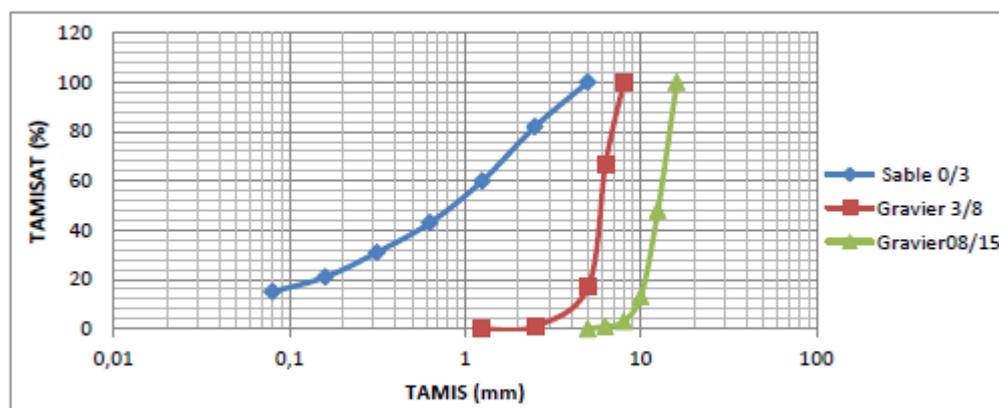


Figure IV.2. Courbes granulométriques des granulats concassés

Les différentes propriétés Physiques et mécaniques des granulats sont présentées sur les tableaux IV.10 et IV.11 à savoir :

Les propriétés physiques :

- La masse volumique absolue : Normes NA 255 et NF P18-555
- La masse volumique apparente : Normes NA 255 et NF P18-555
- Coefficient d'absorption : Normes NA 255 et NF P18-555
- Equivalent de sable suivant la norme : Normes NA 455 et NF P 18-598
- Bleu de méthylène : Normes NA 1948 et NF P 19-592

Les propriétés mécaniques :

- L'essai Los Angeles : Normes NA 458 et NF P18-573
- L'essai Micro Deval : Normes NA 457 et NF P18-572

Tableau. IV.10. Caractéristiques Physiques des granulats

Propriétés mesurés		Granulats		
		Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masses Volumiques (t/m <sup>3</sup> )	Absolute	2.6	2.56	2.62
	Apparente	1.46	1.33	1.37
Coefficient d'absorption(%)		0.14	2.28	1.77
Equivalent de sable(%)		72,7	/	/
Valeur de bleu de méthylène		0.38	/	/

Tableau. IV.11 Caractéristiques mécaniques des granulats

Propriétés mesurés	Granulats		
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Los Angeles LA (%)	/	28	20
Micro Deval MD(%)	/	25	17

#### IV.3.4 L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage des mélanges est de l'eau de robinet, au sein de notre laboratoire « laboratoire des matériaux et durabilité des constructions ». Les résultats de l'analyse chimique de l'eau sont représentés dans le tableau IV.12 selon la norme NF P18-303 (NA 1966) relative à la concentration en matières en suspension et sel dissout.

*Tableau IV.12 : les résultats de l'analyse chimique de l'eau*

concentration en matières et sel dissout dans l'eau (mg/l)	
Echantillons	Concentrations
Matière en suspension	Traces
Sels dissous	1470
Sulfates (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup>	413.56
Chlorures (Cl <sup>-</sup> )	298.2
Calcium (Ca) <sup>+2</sup>	36
PH	7.9
Magnésium (Mg <sup>+2</sup> )	60
Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	27
Carbonates	3.5
Température (°C)	19

#### IV.3.5. Superplastifiant

L'adjuvant utilisé dans notre étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau conforme à la norme EN 934-2, il s'agit de GLENIUM 26.

Le GLINIUM 26, est un superplastifiant à base de polycarboxylates, Il est recommandé pour des BAP destinés à la préfabrication et pour la confection de bétons à hautes performances avec de très hautes résistances au jeune âge. Les principales caractéristiques physico-chimiques sont données dans le tableau IV.13.

Tableau IV.13. Caractéristiques physico-chimiques du superplastifiant GLINIUM26)

Aspect	Liquide
couleur	Brun
Masse volumique	$1.08 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
PH	$7.0 \pm 1$
Teneur en chlorures	<0.1%
Extrait sec	$24 \pm 2\%$
Na <sub>2</sub> O eq	<2
Transport	Non classé
Etiquetage	Pas de symbole exigé

#### IV.3.6 Les Fibres végétales

Dans notre recherche nous avons utilisés 02 types de fibres végétales issus de la même plante, Chanvre et chènevotte, de provenance de la France. Ces fibres sont incorporées dans la composition des BAP devant répondre à une classe de consistance rentrant dans les fourchettes préconisés par l'AFGC d'une part, de l'autre part d'étudier leur influence et de voir les avantages et les inconvénients de leur introduction dans les BAP témoins en tant que renfort. Les propriétés mécaniques et physiques des fibres sont représentées dans le tableau IV.14.



Figure .IV.3 : fibre de chanvre.



Figure. IV.4 : fibre de chènevotte.

*Tableau IV.14. Caractéristiques physiques et chimiques des fibres végétales*

propriétés	Densité (kg /m3)	E (Gpa)	Résistance à la traction (Mpa)	L (cm)
Chanvre	1500	24-90	900	3
Chênevotte	110-140	/	1-1.4	3

### IV.3.7. Les fibres Synthétiques (fibre de polypropylène)

Ce sont des fibres synthétiques industrielles, de provenance de la France. Les caractéristiques de la fibre de polypropylène sont données dans le tableau IV.15

*Tableau VI.15 : caractéristiques de polypropylène*

Caractéristique	Densité (kg /m <sup>3</sup> )	E (Gpa)	Résistance à la traction (Mpa)	L (cm)
Valeur	905	3	250	1.2

*Figure. IV.5 : fibre de polypropylène.*

## IV.4. Composition des mélanges

### IV.4.1. Méthode de formulation:

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développé leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle (la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel). Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP [13].

Deux méthodes de formulation ont été utilisées pour concevoir la composition du BAP dans cette étude expérimentale à savoir : la méthode Chinoise et la méthode basée sur l'optimisation du squelette granulaire et faire la comparaison entre les deux méthodes afin de choisir la méthode la plus avantageuse.

#### IV.4.1.1.Méthode Chinoise

La principale considération de la méthode chinoise est que les vides entre les granulats seront bien remplis avec la pâte (ciment, fillers et l'eau). Un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulats et de pâte. Le PF est défini comme étant le rapport entre la masse des granulats compactés sur la masse des granulats non compactés.

La procédure de la méthode est résumée dans les étapes qui suivent :

- Etape 1 : Calcul des granulats et du sable

$$Wg = PF \times Wgl \left(1 - \frac{S}{a}\right)$$

$$Ws = PF \times Wsl \times \frac{S}{a}$$

$Wg$  : masse de granulats.

$PF$  : packing factor

$Wgl$  : masse volumique du granulat

$Ws$  : masse de sable

$Wsl$  : masse volumique du sable

$S/a$  : rapport entre sable et granulat

- Etape 2 : Calcul de la quantité de ciment

$$C = \frac{f'c}{20}$$

$C$  : dosage en ciment

$f'c$  : la résistance à la compression du ciment

- Etape 3 : Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour le malaxage de ciment

$$Wwc = \left(\frac{W}{C}\right) \times C$$

$\frac{W}{C}$  : Le rapport eau/ciment

- Etape 4 : Calcul de la teneur en fillers ( $W_{pf}$ ) :

$$V_{pf} = 1 - \frac{W_g}{1000 \times G_g} - \frac{W_s}{1000 \times G_s} - \frac{C}{1000 \times G_c} - \frac{W_{wc}}{1000 \times G_w} - V_a$$

$$V_{pf} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \times \frac{W_{pf}}{1000 \times G_f}$$

$G_g$ : Densité du granulat

$G_s$  : Densité du sable

$G_c$ : Densité du ciment

$G_w$  : Densité de l'eau

$G_f$  : Densité du fillers

$V_a$  : volume de l'air

$G_f, G_c, \frac{W}{F}$  sont obtenus à partir des tests.

$\frac{W}{F}$  : rapport eau sur fillers

Calcul d'eau nécessaire pour malaxer les fillers

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \times W_f$$

- Etape 5 : Calcul du dosage d'eau :

$$W_w = W_{wc} + W_{wf}$$

- Etape 6 : Calcul du dosage du superplastifiant :

$$W_{sp} = n\%(C + W_f)$$

$$W_{wsp} = n\%(1 - m\%)W_{sp}$$

$n\%$  : Pourcentage du dosage du superplastifiant dans la pate

$m\%$  : pourcentage du superplastifiant pour les fines.

- Etape 7 : Ajustement d'eau nécessaire pour le BAP
- Etape 8: validation des calculs par les essais à l'état frais – essais de conformité

Les formulations obtenues par les calculs doivent accomplir les conditions suivantes :

- Les résultats d'essais d'étalement, boîte en L et V-funnel doivent être vérifiés.
- Les phénomènes de ségrégation doivent être satisfaits.

#### IV.4.1.2.Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire [11], [13]. Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Ce modèle fait intervenir deux notions physiques :

- La compacité virtuelle du mélange, noté  $g$  : la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent des additions fines aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, (note  $C$ ) est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro3), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment.

The screenshot shows the 'FREE FORMULATION.btl' interface. On the left, there are input fields for composition: G1 (%), G2 (%), S1 (%), C1 (kg/m3), FCalc1 (kg/m3), SP1 (%), Eau eff (kg/m3), and an 'Agent entraîneur d'air?' section with radio buttons for 'Non' and 'Oui'. Below these are 'Environnement' (set to X0), 'Coût fixe' (0), and 'Confinement: Aucun'. On the right, there are buttons for 'Gâcher', 'Optimiser', 'Granularité', and 'Remplissage'. The main part of the interface is a table with 8 columns (Gâchée n° 15-21) and many rows of data.

Gâchée n°	15	16	17	18	19	20	21
G1 (kg/m3)	654,4	649,3	648,9	649	649,1	651	648,8
G2 (kg/m3)	170,8	169,5	169,4	169,4	169,4	169,9	161,3
S1 (kg/m3)	803,6	797,4	796,9	797	797,1	799,5	804,8
C1 (kg/m3)	400	400	400	400	400	400	400
FCalc1 (kg/m3)	120	120	120	120	120	115	120
SP1 (kg/m3)	9	9	9,5	9,4	9,3	9,3	9,3
Eau (kg/m3)	194,9	199,9	199,6	199,6	199,7	199,7	199,7
G1 (%)	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
G2 (%)	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10
S1 (%)	50	50	50	50	50	50	50,5
Taux de saturation (%)	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Taux de superplastifiant (%)	0,9	0,9	0,95	0,94	0,93	0,93	0,93
Eau eff	195	200	200	200	200	200	200
Air total (%)	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
AEA	Non						
Rapport G/S	1,027	1,027	1,027	1,027	1,027	1,027	1,007
Eeff/C	0,488	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Environnement	X0						
C + kA	400	400	400	400	400	400	400
Eeff / (C + kA)	0,488	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Densité	2,353	2,345	2,344	2,344	2,345	2,344	2,344
Affaissement (cm)	27,3	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
fc7 (MPa)	31,5	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
fc28 (MPa)	45,9	44,2	44,1	44,2	44,2	44,2	44,2
Retrait total (10-6)	1171	1208	1211	1210	1210	1201	1216
Indice de serrage du béton non confiné	5,905	5,703	5,699	5,7	5,7	5,686	5,704
Prix	88,77	88,62	89,35	89,21	89,06	88,96	89,05

Figure IV.6 : Interface de Bétonlab Pro

#### VI .4.2. Comparaison entre la formulation Bétonlabet chinoise

Avant de choisir la formulation finale on a fait une comparaison entre les deux, pour avoir une meilleure formulation pour réussir un BAP renforcé par des fibres végétales et synthétiques et la plus compatible avec les codes et les normes.

*Tableau IV.16 : Quantité des constituants de base des deux formulations*

Constituants	Formulation Bétonlab Pro	Formulation chinoise
Ciment	400	409.9
Filler calcaire	120	135.00
Sable	804.8	810.12
Gravier (3/8)	161.3	166.09
Gravier (8/15)	648.8	603.57
Superplastifiant	9.5	9.25
Eau	203.2	219.92

On remarque dans le tableau IV.16 qu'il y a une différence entre les deux formulations d'un côté économique et dans la consommation de quantité d'eau et superplastifiant et d'après cette comparaison on a conclu que la formulation de bétonlab est plus économique que la formulation chinoise.

Après la comparaison économique on a fait une autre comparaison entre les deux formulations à l'état frais pour confirmer à quel point l'une des deux formulations est compatible avec notre travail.

Les résultats à l'état frais sont représentés dans le tableau IV.17

*Tableau IV.17 : Comportement des deux formulations à l'état frais*

Essais	Approche bétonlab pro	Approche chinoise
Etallement (cm)	73	71.5
T <sub>50</sub> (s)	2	2.02
j-ring (%)	0.15	0.6
D <sub>j</sub> (cm)	71.5	71
V-funnel (s)	10.73	16.8
Boite en L (%)	0.91	0.94
Stabilité au tamis (%)	15.4	18.94

D'après les essais à l'état frais et la confrontation avec les normes et les recommandations requises des BAP, on a confirmé qu'il y a beaucoup d'avantages dans l'approche bétonlab par rapport à l'approche chinoise et pour cette raison on a adopté pour notre étude la formulation de bétonlab pro 3.

#### IV.4.3. Formulations retenues

Quatre formulations de béton ont été étudiées dans le cadre de ce travail. La première formulation correspond à un béton autoplacant sans fibre (témoin), la deuxième formulation est associée à un béton autoplacant renforcé avec des fibres de chanvre, la troisième formulation est celle d'un béton autoplacant avec chènevotte. La quatrième formulation consiste en un béton autoplacant renforcé avec des fibres de polypropylène.

Après des essais préliminaires d'une quinzaine de compositions, on a trouvé la composition finale pour chaque mélange qui sont représentées dans le tableau IV.18.

Tableau IV.18. : La composition retenue pour chaque mélange

Composition Kg/m <sup>3</sup>	Désignation des BAP			
	BAP	BAPCV	BAPCT	BAPPP
Ciment	400	400	400	400
Sable	120	120	120	120
Filler calcaire	804.2	804.2	804.2	804.2
Gravier (3/8)	161.3	160.3	160.3	160.3
Gravier (8/15)	648.8	647.8	647.8	647.8
Eau	203.2	217.2	207.7	220.2
Superplastifiant	9.5	9.86	9.68	10.11
Fibres	/	2	2	2

#### IV.4.4. Fabrication des mélanges

- **Malaxage**

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical planétaire, d'une capacité de 180 litres, suivant la norme NFP18-404.



*Figure IV.7 : Malaxeur à béton utilisé*

La séquence de malaxage était la suivante :

- Prémouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur.
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers (3/8 et 8/15), le sable avec un temps de 1 minute.
- Introduction du ciment et les additions (FC) avec 2 minutes de malaxage.
- Ajout des fibres dans chaque mélange avec 1 minute de malaxage.
- Malaxage puis introduction de l'eau et adjuvant pour 3 minutes.

La figure IV.8 représente la répartition des fibres dans le malaxeur



*Figure IV.8 : Répartition des fibres à sec*

- **Fabrication des éprouvettes**

C'est une étape importante dans la chaîne de contrôle du béton. Il s'agit de prélever de petit volume de béton et de réaliser des éprouvettes qui permettront de caractériser les qualités du béton. En suivant les prescriptions de la norme NF P 18 442, on est assuré de minimiser les dispersions dues à la confection.

Les BAP se distinguent des BV, par leur propriété à l'état frais ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, dont l'absence de vibration.

Avant le remplissage, on applique un lubrifiant sur les parois à fin d'éviter la cohésion de la pâte.

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication avec une protection d'un film de plastique souple.



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figure IV.9: Corps d'épreuves utilisés*

(a) éprouvettes Cylindriques (10 x20) cm, (b) éprouvettes Cylindriques (16x32) cm

(c) éprouvettes prismatiques 7x7x28cm, (d) éprouvettes cubiques 10x10 x10 cm.

- **Conservation**

Après la fabrication des corps d'épreuve, on couvre leurs parties apparentes (facettes supérieures d'un film plastique, pour éviter tout départ d'eau ou échange avec le milieu extérieur.

Après 24 heures, on effectue le démoulage. Par la suite, les éprouvettes sont conservées jusqu'au moment de l'essai comme suit :

- ✓ Les Cylindres (10x20) et les prismes (7x7x28) destinées à l'écrasement pour la détermination des propriétés mécaniques classiques sont conservées dans un milieu de  $95 \pm 5$  % d'humidité relative et à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au moment de l'essai qui s'effectue à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.
- ✓ Les Cylindres (16x32)cm destinées pour mesurer le module d'élasticité sont conservées dans un milieu de  $95 \pm 5$  % d'humidité relative et à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'au moment de l'essai qui s'effectue à 7, 14 jours.
- ✓ Concernant les mesures des déformations totaux de retrait, les éprouvettes sont conservées dans la salle d'essai à une température  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $55 \pm 5\%$  d'humidité relative.
- ✓ Pour les mesures des déformations endogènes de retrait, les éprouvettes sont isolées de l'humidité ambiante (aluminium adhésif) dès le démoulage. Bien que les éprouvettes ne soient pas sensibles aux conditions environnementales, elles sont stockées dans les conditions d'essai, à savoir une ambiance à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $55 \pm 5\%$  d'humidité relative.

La figure IV.10 présente les éprouvettes cylindriques et prismatiques immergées dans l'eau après le démoulage.



*Figure IV.10 : Bassin de conservation des éprouvettes.*

## IV.4.5. Caractérisations des mélanges

### IV.4.5.1. Caractérisation a l'état frais

Avant d'accepter une composition comme étant celle d'un BAP, il faut s'assurer que les propriétés du béton à l'état frais possèdent certains critères établis selon les recommandations AFCG [08]. Différents essais spécifiques permettent de caractériser les BAP à l'état frais. On présentera ceux qui ont été utilisés dans cette étude: Essai d'étalement ou slump-flow, essai de la boîte en L, essai de V-funnel, essai de J-ring, essai de stabilité au tamis, essai de l'air occlus, la densité. Les dispositifs d'essais ont été conçus et fabriqués par les membres de l'équipe « Ingénierie des matériaux » du Laboratoire LMDC.

- **Essai d'étalement «Slump Flow»**

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en oeuvre. Il permet de caractériser la fluidité du béton et de tester la capacité des BAP à se déformer uniquement sous le seul effet de leur poids et de s'étaler pour remplir un milieu non confiné par les mesures:

- de la capacité de remplissage (taux de remplissage ou distance atteinte dans l'espace) donnée par le diamètre final atteint par la galette de béton.
- de mesurer la vitesse d'étalement qui est une indication importante (T500 temps pour obtenir une galette de 500 mm de diamètre).

Le matériel nécessaire est composé des éléments suivants (figure IV.11) :

- un cône d'Abrams
- une plaque métallique carrée d'au moins 90 cm graduée à un diamètre de  $500 \pm 1$  mm
- un mètre
- un niveau à bulle



Figure IV.11: Principe de l'essai au cône d'Abrams

Le diamètre moyen ( $D_{moyen}$ ) de l'étalement est mesuré et calculé comme il suit :

$$Etalement = D_{moyen} = \frac{D1+D2}{2}$$

- **Essai de la boîte en L**

Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné, de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement. Le matériel utilisé lors de cet essai est une boîte en L et un ferrailage à trois armatures (figure IV.12). La procédure de l'essai est décrite comme suit : la partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton. Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. Formé de 03 barres  $\Phi$  16 distantes 50 mm. La distance entre les barres est de 50 mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  respectivement dans la partie verticale et horizontale de la boîte, et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $h_2/h_1$



Figure IV.12: Essais de la boîte en L

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs  $h_2/h_1$ ) doit être supérieur à 0,8[10]. Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

- **Essai d'entonnoir V-Funnel**

L'essai V-Funnel, qui consiste à étudier l'écoulement du BAP a travers l'entonnoir en forme de V (figure IV.13). La procédure du test est la suivante : l'entonnoir est rempli jusqu'à arasement. Ensuite le clapet de fermeture situé à sa base est ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 12 secondes est recommandé pour le béton autoplacant[12].



*Figure IV.13 : L'essai de V-funnel*

- **Essai J-Ring**

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu fortement ferraillé. L'équipement nécessaire à la conduite de l'essai est formé par (figure IV.14) :

- même plateau que l'essai d'étalement en milieu non confiné.
- Cône d'Abrams.
- Anneau équipé de barres en acier (J-RING)
- mètre ou régllet.

Le principe de l'essai est de placer le cône d'Abrams au centre du plateau du J-RING, puis de remplir d'une quantité représentative de béton. Il faut ensuite soulever le cône puis mesurer l'étalement obtenu ainsi que les hauteurs de bétons situées au centre du plateau et à la sortie des barres de J-RING.



Figure IV.14 : L'essai de J-Ring.

- **Essai de stabilité au tamis**

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplacants vis-à-vis du risque de ségrégation. L'équipement nécessaire à la conduite de l'essai est formé par un seau de 10L muni d'un couvercle, un tamis de maille 5mm avec fond et une bascule de précision minimale de 20g et de portée 20Kg (figure IV.15).



Figure IV.15: Essai de stabilité au tamis

L'essai consiste à :

- Prélever une quantité de béton frais ( $4.8 \pm 0.2\text{Kg}$ ) d'un échantillon de 10 litres mis au repos pendant 15 mn.
- Observer et noter l'éventuelle présence de ressuage à la surface du seau après les 15 minutes.
- Peser le fond seul  $\rightarrow P_{\text{fond}}$
- Peser l'ensemble tamis muni de son fond vide  $\rightarrow P_t$
- Déverser sur un tamis de maille 5mm cette quantité avec une hauteur de chute de 50 cm

- Peser le poids de l'échantillon versé ➔  $P_f \text{ échantillon} \leq 4,8 \text{ Kg}$
- Peser après 2 minutes la laitance qui a traversé le tamis « P laitance »
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par «  $\pi$  » ➔  $\pi = \frac{P_{\text{laitance}} \times 100}{P_{\text{échantillon}}}$

Un pourcentage élevé de laitance par rapport à la masse initiale est un indicateur d'une faible résistance à la ségrégation. L'AFGC préconise que le pourcentage de laitance trouvé soit inférieur ou égal à 15%

- **Airs occlus**

A la sortie du malaxeur, la teneur en air est mesurée à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres de capacité. Cet aéromètre est constitué d'une cuve recevant l'échantillon de béton et d'un couvercle rigide muni d'un cadran gradué (figure IV.16).



Figure IV.16: Dispositif de mesure de l'air occlus

L'ensemble couvercle-cuve est fixé par un mécanisme étanche et le tout est rempli d'eau. Une pression est ensuite appliquée sur l'échantillon en utilisant une pompe à air installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression provoque une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. L'appareil est calibré de façon à donner la teneur en air totale en % par lecture directe du niveau d'eau sur l'échelle graduée.

- **Densité**

On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre remplis par le mélange avant la mesure de l'air occlus. La densité est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (fond de l'aéromètre), remplis de béton autoplaçant sans vibrer (figure VI-17).

Si P est le poids du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et P0 celle du récipient vide, la densité est déduite par l'application de la formule suivante :

$$\rho = \frac{P - P_0}{V}$$

Où V est le volume du récipient utilisé (8 litres).



*Figure IV.17 : Mesure de la densité*

#### **IV.4.5.2. Caractérisation à l'état durcis**

- **Essai de compression**

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression du béton étudié sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 20 cm qui ont été conservées dans un milieu à 20°C et 95 ± 5% d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (3, 7, 14, 28 et 90 jours).

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force, La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés à vitesse de chargement de 0,5 MPa/s. (Figure IV.18).



*FigureIV.18 : Appareil d'essai de compression*

Les éprouvettes sont placées verticalement et leurs faces sont en contact direct avec les plateaux de la presse. Elles sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression est calculée.

$$F_c = \frac{f_{max}}{A_c}$$

Avec:  $F_{max}$ (en N) la charge maximale, et  $A_c$ (en  $mm^2$ ) la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.

- **Essai de traction par flexion**

Les essais de la flexion trois points sont réalisés à 3, 7, 14, 28 et 90 jours de durcissement du béton sur des éprouvettes prismatique  $7 \times 7 \times 28$  cm. Les échantillons sont soumis à un moment de flexion par application d'une charge constante et continue au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs en trois points sur une presse CONTROLS à vérin hydraulique.(figure IV.19).

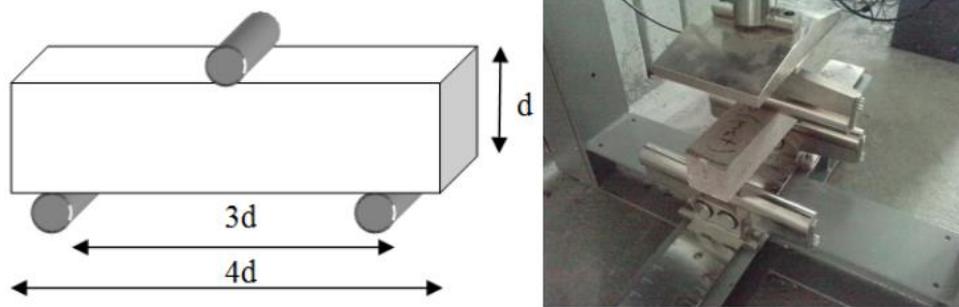


Figure IV.19 : dispositif de l'essai de traction par flexion.

La mesure est quasi-statique et la vitesse d'asservissement du compactage est très faible, de  $0.1 \text{ kn/s} \pm 1\%$  suivant la norme l'EN 12390-5. Les faces des éprouvettes sur lesquelles on applique la charge sont apprêtées et présentent des surfaces planes. A partir de la charge maximale, la résistance à la traction par essai de flexion trois points peut être calculée.

D'après la norme EN 12390-5, la résistance de traction à la flexion est donnée indirectement par la contrainte correspondant à la force maximale  $F$  flexion admissible par éprouvette en flexion par trois points avant rupture ( $L=3d$ ,  $a=d$ ).

$$R_{\text{tr}} = \frac{L \times F \times a}{8 \times l} = \frac{3 \times F \times L}{8 \times a^3}$$

- **Détermination de module de young (E)**

La mesure du module est effectuée à l'aide d'un extensomètre mécanique qui permet de faire des mesures de déformations sur deux directions des cylindres pendant cinq cycles de mise en charge (figure IV.20).

On a utilisé dans la mesure du module d'élasticité des éprouvettes cylindriques  $16 \times 32 \text{ cm}$ . La norme sur la mesure du module de Young propose de mesurer la pente entre 50% et 30% de la charge de rupture, la résistance à la rupture correspond à la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai. La déformation du matériau est obtenue par le déplacement du comparateur et en divisant ce déplacement par la hauteur de mesure qui est de 320 mm. Les essais ont été réalisés au moyen de la même presse. L'acquisition des données (capteur de force) est assurée par l'unité de pilotage de la presse. L'acquisition a été effectuée manuellement.

L'essai est réalisé à une vitesse de  $0,05 \text{ MPa/s}$ , les résultats du module d'élasticité à différentes échéances 7, 28 et jours sont la moyenne de trois essais pour chaque type de béton.

Le calcul du module est effectué à partir des déformations relevées (enregistrées) entre 10% et 30% de la résistance en compression du dernier cycle.

Le module d'Young est déterminé après avoir tracé la courbe contrainte/déformation correspondant à la pente de chargement.



*Figure IV.20: Appareil du module d'élasticité.*

## **IV.5. Propriétés étudiées**

### **IV.5.1. Variations dimensionnelles et pondérales**

Le but de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. Cet essai est exécuté sur matériau durci grâce à un rétractomètre, admettant de mesurer les variations de longueur des spécimens selon deux conditions :

- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,
- Sans échange hydrique avec l'ambiance en enveloppant les éprouvettes dans une ou deux feuille (s) de papier aluminium autocollant : on mesure le retrait endogène.

Les échantillons testés dans cette étude sont prismatiques (de dimensions 7x7x28 cm). Ceci a entraîné l'utilisation d'un dispositif de mesure présenté sur la figure IV.21.



*Figure IV.21 : Mesure des variations dimensionnelles.*

Des essais en perte en poids ont été réalisés sur mêmes bétons à l'aide d'une balance (Figure IV.22).



*Figure IV.22. Balance*

#### **IV.5.2. Comportement à l'élévation de température**

Des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm ont subi un traitement thermique afin de quantifier leurs résistances à la compression dans une étuve à moufle (figure IV. 23).

Nous appliquons quatre cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 110°C, 220°C, 300°C et 600°C pour les quatre bétons étudiés (BAPT, BAPCV, BAPCT, BAPPP) après (28) vingt-huit jours de durcissement. La première phase du cycle se compose d'une rampe de montée en température de vitesse égale à 1°C/min. La seconde est un palier de température dans le four durant 3 heures. La dernière phase est une rampe de

refroidissement jusqu'à la température ambiante (figure IV.24). Les vitesses de montée et de descente en température se réfèrent aux recommandations du comité technique TC-129 de la RILEM.



Figure IV.23: Four à moufle (1200 C°)

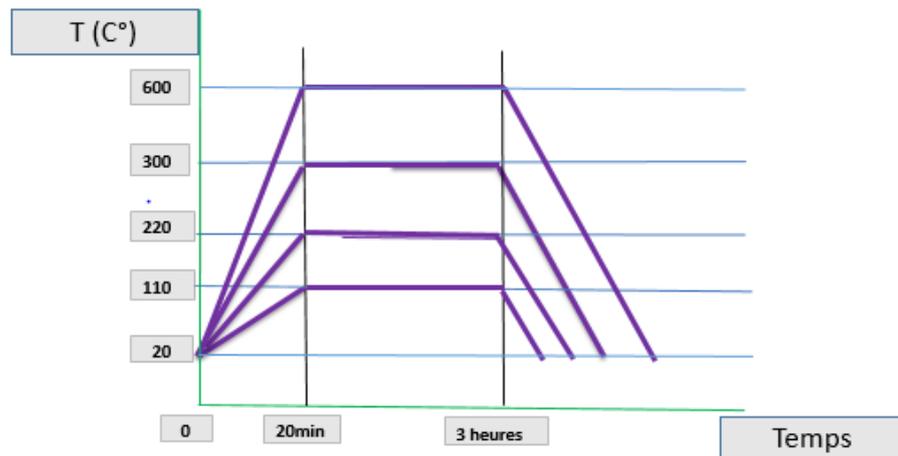


Figure IV.24. Cycles de l'élévation de la température

### IV.5.3. Porosité capillaire

Le transfert de liquides dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface dans les capillaires, est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec par remontée capillaire (absorptivité) dépend de la porosité ouverte et de réseaux poreux du béton [47].

L'objectif de cet essai est donc de suivre la masse d'eau absorbée par des BAP fibrés au cours du temps pour mettre en évidence d'éventuelle différence de porosité ouverte dans nos

bétons. Cet essai a été effectué sur des échantillons prismatiques (7x7x28) cm et cubiques (10x10x10) cm conservés 28 jours à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $95 \pm 5\%$  d'humidité relative.

A l'issue de cette période de cure, les échantillons sont prélevés puis placés dans une étuve à  $60 \pm 2^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de leur masse (variation de masse entre deux pesées espacées de 24h inférieure à 0,1%). Une fois cette opération réalisée, la face latérale des échantillons est recouverte de papier aluminium autocollant afin d'éviter tout échange hydrique radial.

L'essai d'absorption capillaire est lancé après cette dernière précaution. Pour cela, les éprouvettes testées sont initialement pesées ( $M_0$  en kg) puis immergées dans l'eau sur une hauteur de 1.5 cm (figure IV.25). A échéances données et après avoir épongé chaque échantillon, l'évolution de la masse est suivie par pesée ( $M_i$ ).



Figure IV.25 : Essais d'absorption capillaire

Le coefficient d'absorption capillaire ( $C_i$ ), exprimé en  $\text{kg}/\text{m}^2$  est calculé par l'intermédiaire de la relation suivante :

$$C_i = \frac{M_i - M_0}{A}$$

Où  $A$  la section de l'éprouvette en  $\text{m}^2$ .

#### IV.6.L'attaque Sulfatique

Pour pouvoir observer et analyser le comportement de nos échantillons, vis avis de l'attaque sulfatique, nous avons adopté la méthode de la norme ASTM C 1012 dans laquelle les spécimens ont été entièrement immergés dans une solution sulfatique ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), la procédure

d'essai a été effectuée en immergeant des échantillons de béton après 28 jours de cure dans un réservoir d'eau de robinet (milieu de référence), dans des bacs d'eau contenant 5% de concentration de ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (figure IV.26).



Figure IV.26 : les bacs de conservation (solution ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ))

Dans les conditions naturelles d'exposition, l'agressivité vis-à-vis de l'attaque sulfatique est très lent, il est donc nécessaire de disposer d'essais de vieillissement, plus ou moins accélérés. De ce fait on a choisi une procédure pour accélérer ce phénomène en se basant sur la littérature [43], qui a exposé ces échantillon aux cycles séchage –Mouillage.

La figure IV-27 représente les étapes de la procédure :

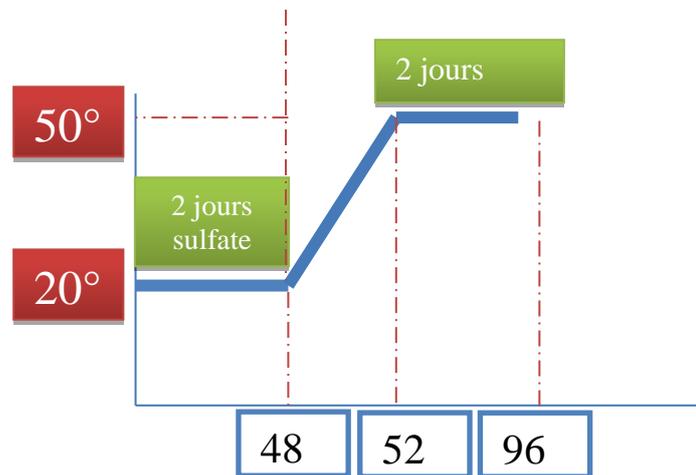


Figure IV.27: Cycles séchage-mouillage de l'attaque sulfatique

## **IV.7.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons déterminé les caractéristiques des matériaux de base pour l'élaboration des différents mélanges ainsi que la présentation des essais pour la confection des BAPF. Tous les composants sont conformes aux normes et recommandations pour leur utilisation dans les bétons hydrauliques selon les objectifs désirés ce qui nous facilite l'adoption d'une approche de formulation adéquate.

Ces caractéristiques intrinsèques des différents constituants nous permettent de comprendre les modifications apportées aux performances des différents mélanges retenus sous différents types de corps d'épreuve étudiés ainsi ceux décrivant les évolutions de ses principales caractéristiques physiques et mécaniques en fonction des différentes fibres avec une méthode de formulation que nous avons étudié sous un milieu agressif.

**CHAPITRE V :**  
***RESULTATS ET DISCUSSIONS***

## V.RESULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats obtenus dans cette recherche et cela pour montrer l'influence de type de fibre sur les propriétés des mélanges à l'état frais afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L, J-ring, V-funnel, stabilité au tamis, air occlus et la densité). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés sur les mêmes mélanges à des échéances précises (performances mécaniques, module d'élasticité).

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aussi à l'influence des fibres sur les variations dimensionnelles dues au retrait, la perte en poids, la porosité capillaire, et de caractériser expérimentalement la réponse des BAP et BAPF sous des conditions extrêmes de haute température, et sous environnement agressif (Attaque sulfatique).

### V.2. Qualification des bétons d'autoplacants

Une liste non exhaustive des essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état frais a été présentée dans la synthèse bibliographique (voir chapitre IV). Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis, V funnel, J-Ring, air occlus et la densité.

#### V.2.1. L'essai d'étalement

Le critère d'ouvrabilité pour un BAP, est le critère d'écoulement non confiné représenté par l'essai d'étalement au cône d'Abrams, de plus pour cet essai, le temps d'écoulement T50 a été mesuré.

Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau V.1.

*Tableau V. 1: Les résultats de l'essai de l'étalement.*

	BAPT	BAPCTT	BAPCV	BAPPP
Etalement (cm)	73	71.5	65.5	61
T50 (s)	2	2.07	2.4	2.62

Plusieurs observations peuvent être faites sur les résultats d'étalement de nos bétons :

- L'étalement spécifié était respectivement compris entre 61 et 73 cm.
- Les résultats obtenus montrent que tous les bétons (BAPT, BAPCV, BAPCT et BAPPP) ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP, d'après les recommandations de l'AFGC [10].
- Le temps mesuré (T50) pour atteindre une galette de 50 mm de diamètre des différents bétons sont dans l'intervalle de 2-5 s ce qui signifie les limites inférieures et supérieures du temps T50.
- Nous constatons que le BAPT a un étalement de 2% de plus par rapport au BAPCT et de 10% de plus par rapport au BAPCV et de 16% par rapport au BAPPP. Cela approuve que l'introduction des fibres dans les bétons affecte la maniabilité.

La figure V.1 montre la relation entre l'étalement et le T50.

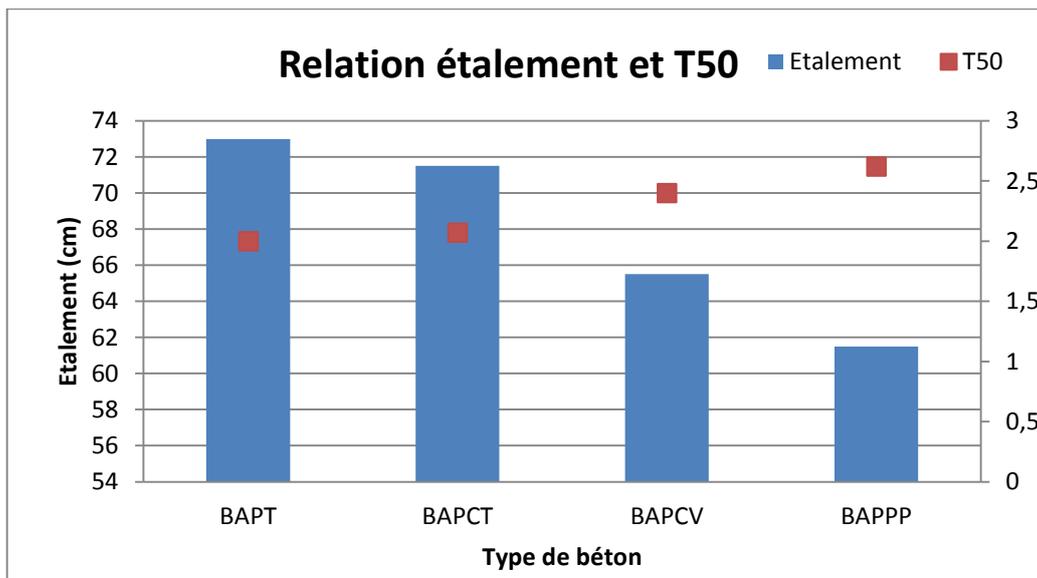


Figure V.1 : Relation entre l'étalement et T50.

D'après la figure V.1, on constate que plus l'étalement augmente le temps d'écoulement diminue, ou en d'autre terme l'augmentation de fluidité entraîne une diminution de la viscosité.

La figure V.2 représente les galettes obtenues au cours de l'essai d'étalement du BAPT et BAPCT.

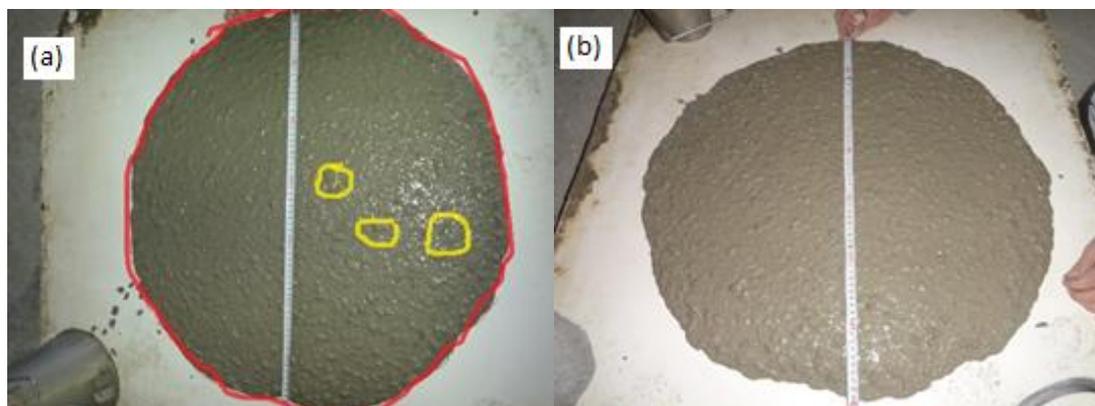


Figure V.2. : Les galettes obtenues au cours de l'essai d'étalement du (a) BAPT et (b) BAPCT

-Pour les compositions des BAPT, BAPCT, BAPCV, l'aurole de laitance à la périphérie des galettes de béton était très faible. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton. Par contre pour le BAPPP, on observe qu'il y a une accumulation des gros granulats au centre de la galette par une formation d'une auréole de laitance à ses extrémités.

### V.2.2. Mobilité en milieu confiné

Deux essais ont été effectués pour avoir la mobilité des bétons en milieu confiné, l'essai de la boîte en L et l'essai de j-Ring.

- **l'essai de la Boîte en L**

Les résultats de l'essai de la Boîte en L des différents bétons sont résumés dans le tableau V.2 :

Tableau V.2: Les résultats du rapport H2/H1

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCT	BAPPP
Essai de la boîte en L	0.91	1	0.9	0.45

La figure V.3 représente les résultats de la boîte en L des quatre bétons :

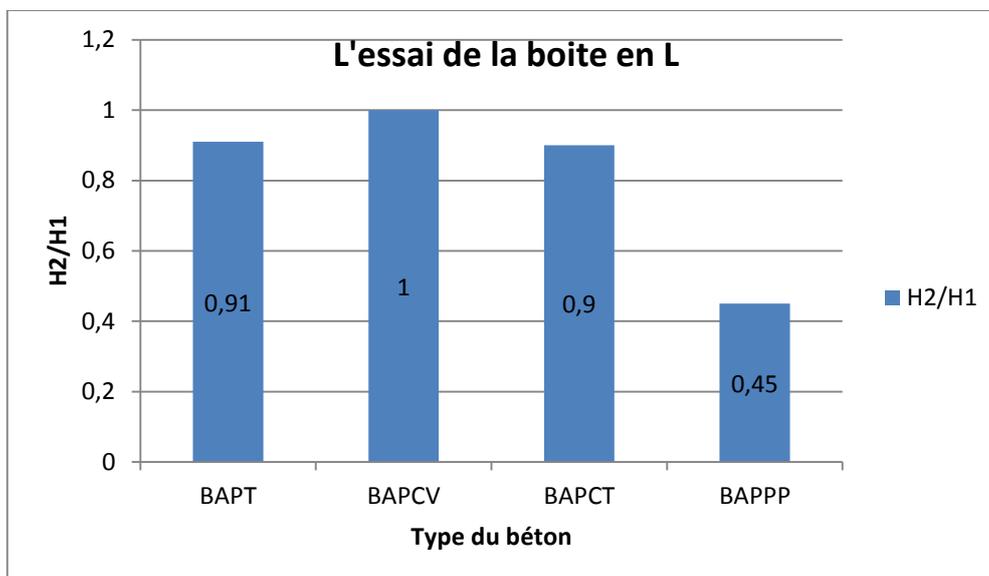


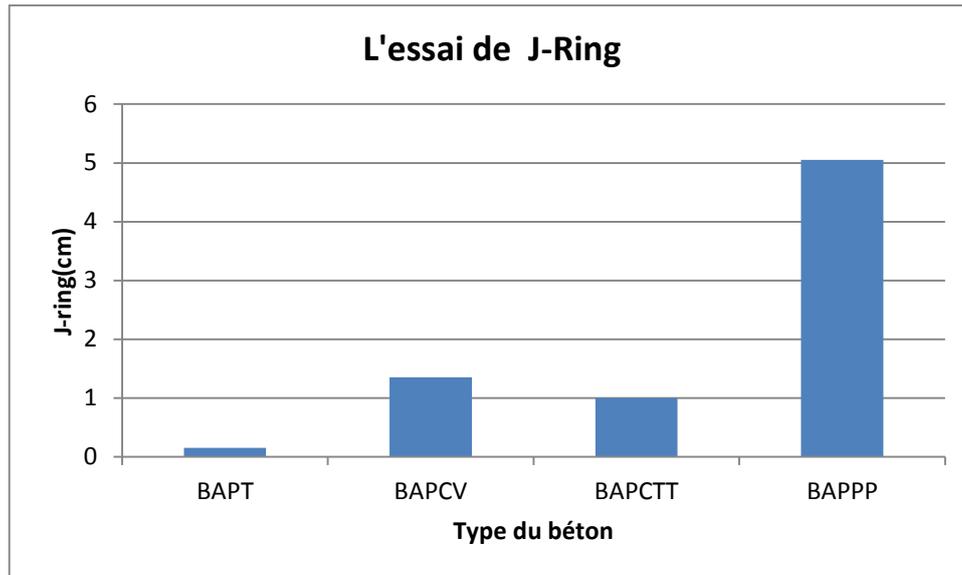
Figure V.3: Les résultats de l'essai de la boite en L

- **L'essai J-Ring**

Les résultats de L'Essai de J-ring des différents bétons sont résumés dans le tableau V.3 :

Tableau V.3: Les résultats de l'essai de J-Ring

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPPP
Essai J-Ring (cm)	0.15	1.35	1	5.05



*Figure V.4: Les résultats de l'essai de J-Ring*

La figure V. 5 représente la mobilité des BAPT, BAPCT, BAPCV au milieu confiné (essai de la boîte en L et essai du J-Ring).



*Figure V.5 : La mobilité des BAPT, BAPCT, BAPCV au milieu confiné*

Pour les deux essais Les résultats obtenus sont conforme à ce que l'on peut attendre d'un BAP. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler pour les BAPT, BAPCT, BAPCV.

Par contre, il a été remarqué que le BAPPP a rencontré des grandes difficultés lors de l'écoulement dans un milieu confiné comme le montre la figure V.6.



*Figure V.6 : Blocage de BAPPP*

### V.2.3.L'essai V-Funnel

Les résultats de l'essai de V-funnel sont résumés dans le tableau V.4 :

*Tableau V.4: Les résultats de l'essai de V-funnel*

<b>Béton</b>	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPP
Le temps d'écoulement (s)	8.44	9.39	8.73	10.47

La figure V. 7 illustre les résultats de l'essai V-Funnel.

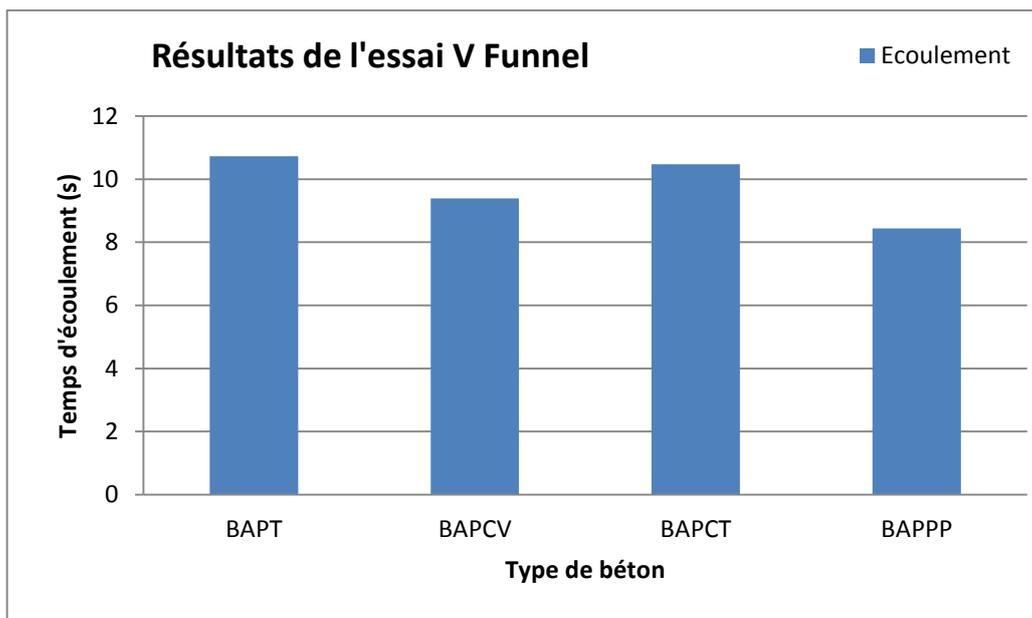


Figure V.7 : Les résultats de l'essai V-funnel.

D'après la figure V. 7 on constate que le temps d'écoulement mesuré par l'entonnoir était respectivement compris entre 9 et 25 s et se rapproches à des valeurs couramment rencontrées (dans les fourchettes de l'AFGC) (voir tableau V.4).

#### V.2.4. L'essai de Stabilité au tamis

La figure V. 8 représente les résultats de l'essai de stabilité au tamis.

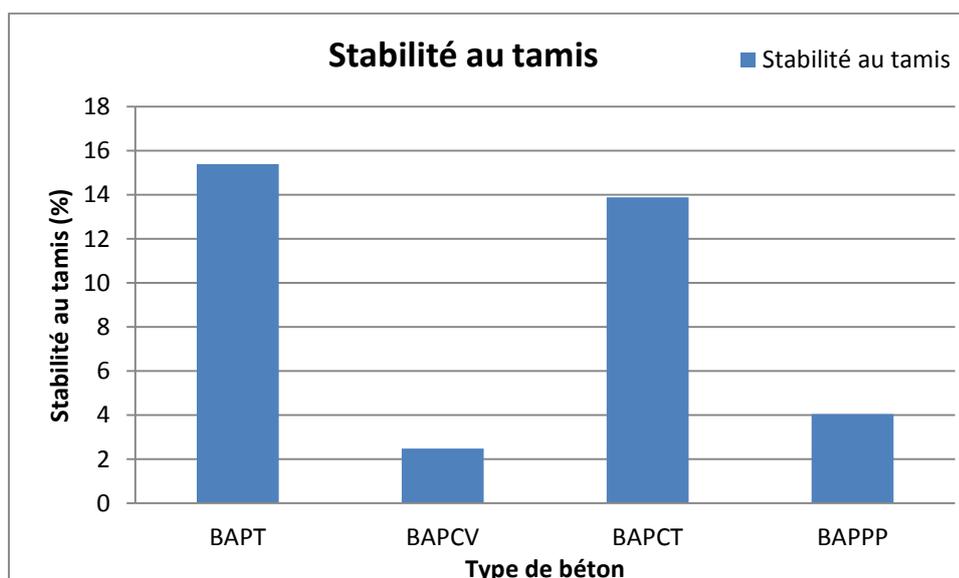


Figure V.8 : Stabilité au tamis

Selon la norme (NF EN 12350-11) la valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la Ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité du BAP. Tous nos bétons ont un taux de ségrégation inférieur à 15% synonyme d'une stabilité correcte.

### V.2.5. La densité

La figure V. 9 illustre les résultats de la densité.

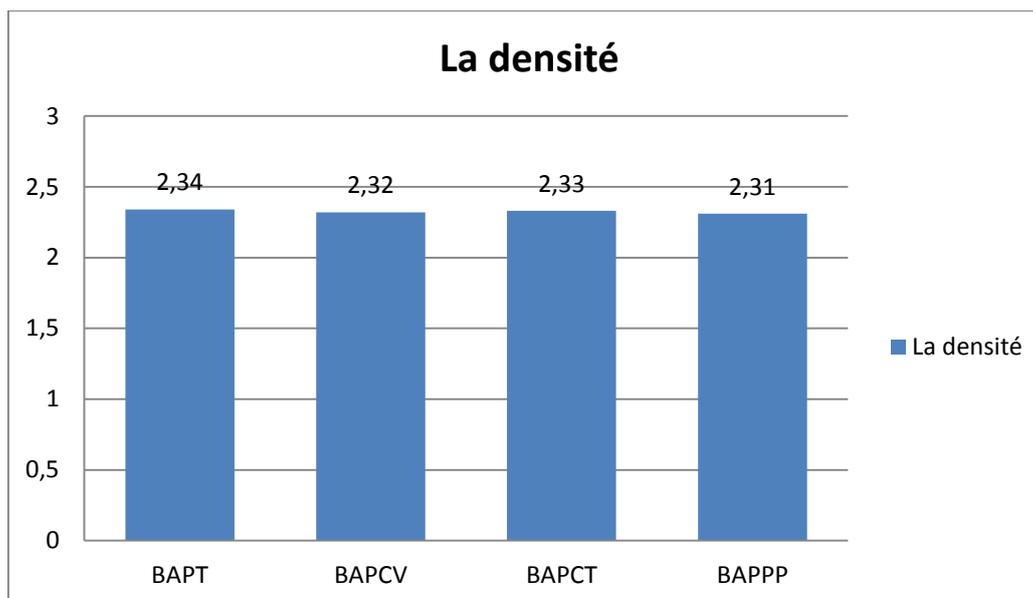


Figure V.9 : Valeur de la densité.

D'après la figure V.9 on constate que les résultats de tout les BAP sont très proches de l'un à l'autre.

### V.2.6. L'air Occlus

Le tableau V.5 regroupe les résultats de l'essai de l'air occlus effectués.

Tableau V.5: Les résultats de l'air occlus

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPPP
Air occlus (%)	1.9	2.1	1.45	1.27

La figure V.10 représente les résultats de l'essai de l'air occlus des quatre mélanges (BAPT, BAPCV, BAPCT, BAPPP).

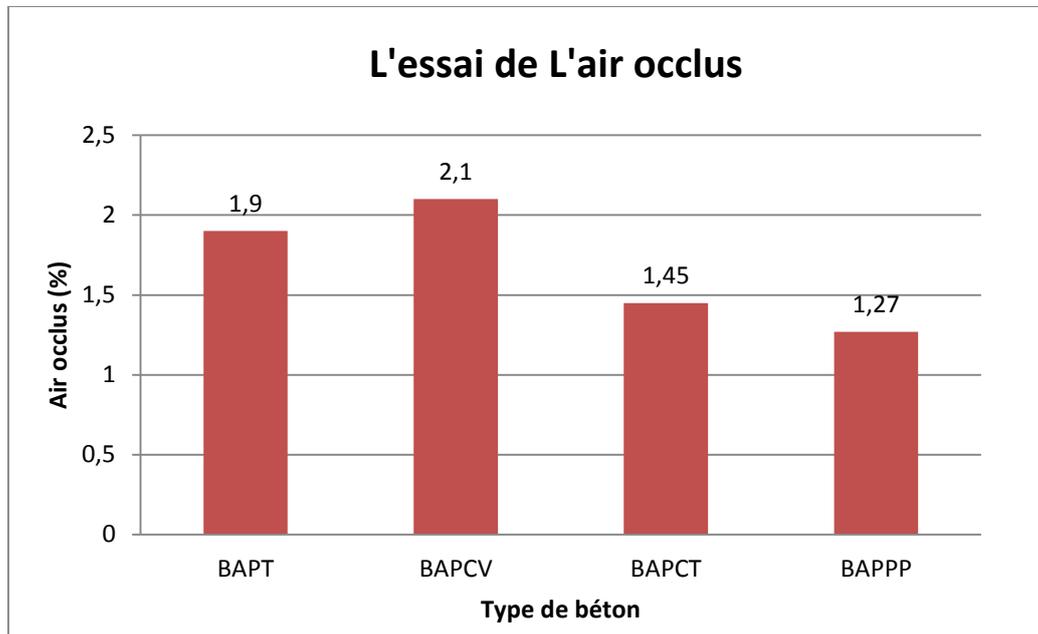


Figure V.10 : L'essai de l'air occlus.

D'après la figure V.10 on remarque que la teneur en air des BAPCT et BAPPP presque identique et la teneur en air de BAPCV est plus élevée de 30,95 %, 39,52% par rapport au BAPCT et BAPPP respectivement.

### V.3. Caractérisation mécanique des BAPF

Pour chacun des mélanges énumérés dans le tableau, On a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- la résistance à la compression cylindrique (10x20) cm à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.
- la résistance à la traction par flexion prisme (7x7x28) à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.

#### V.3.1. Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des BAPT, BAPCV, BAPCT, BAPPP a été mesurée au cours du temps sur des éprouvettes 10x20 cm. Les valeurs moyennes des résistances à la compression sont données dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : Résistances à la compression sur cylindres (10x20) en Mpa.

Résistance à la compression (10×20) cm					
Béton	3 jrs	7 jrs	14 jrs	28 jrs	90 jrs
BAPT	39,15	46,06	48,3	50,29	59,2
BAPCV	22,49	33,35	44,37	42,86	44,74
BAPCT	26,24	39,65	44,59	44,15	54,38
PAPPP	23,09	27,76	35,43	35,13	40,2

La figure V.11 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP pour différents fibres.

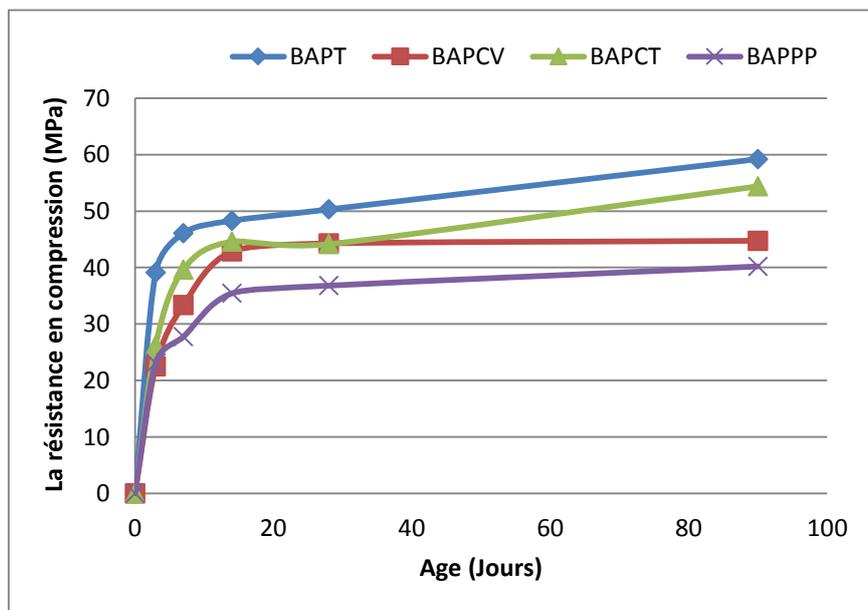


Figure V.11 : Résistance à la compression des éprouvettes cylindriques (10x20) cm.

D'après la figure V.11, on remarque que la cinétique de l'évolution de la résistance à la compression des différents types du béton est différente, à titre d'exemple, on remarque que les fibres de polypropylène n'ont pas une grande influence sur le béton autoplaçant et n'améliorent pas la résistance à la compression. Pour les deux résultats des fibres (chanvre, chènevotte) on constate qu'à jeune âge les résultats sont plus bas que le témoin (retard de

prise) et cela est confirmé par la littérature [46], puisque la matière cellulosique qui se trouve dans les végétations joue un rôle de retardateur de prise.

Aussi et d'après la littérature l'ajout des fibres végétales au béton n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire augmente la porosité, et donc une diminution de la compacité, d'où une diminution de la résistance à la compression.

On remarque, concernant la cinétique résistance –âge Entre fibre et fibre à titre d'exemple on observant qu'entre 3 et 7 jours il y a une petite évolution pour le polypropylène (17%). par contre les fibres de chanvre et de chènevotte présentent une évolution considérable respectivement (32,56%), (33,82%).Entre 7 et 14 jours on remarque que les résistances des BAPPP et BAPCV ont continué d'augmenter en résistance alors que les BAPCT a tendance de stabiliser.

Donc, on peut conclure que :

-Les résistances à la compression des BAP fibrés sont systématiquement plus faibles que celles du BAP non fibré(BAPT).

-En considérant les résultats obtenus par diverses fibres, le plus édifiant est la performance acquise par le chènevotte.

-L'introduction de la fibre végétale dans le BAP n'améliore pas la résistance à la compression, ni au jeune âge ni au moyen terme.

La résistance mécanique des BAP fibrés diminue significativement. Cette diminution est imputée à un rapport E/L plus élevé.

### **V.3.2.Résistance à la traction par flexion**

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des BAPT, BAPCV, BAPCT et BAPPP a été mesurée au cours du temps sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm. Les valeurs moyennes des résistances sont données dans le tableau V.7.

Tableau V.7. Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 cm(Mpa)

Résistance à la traction par flexion (7×7x28) cm (Mpa)					
Béton	3 jrs	7 jrs	14 jrs	28 jrs	90 jrs
BAPT	5,52	8,46	8,89	9,74	11,14
BAPCV	5,3	8,31	8,45	8,92	9,52
BAPCT	5,46	8,39	8,68	9,01	10,7
BAPPP	4,8	7,47	7,6	8,15	9,05

La figure V.12 montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du BAP pour différents fibres.

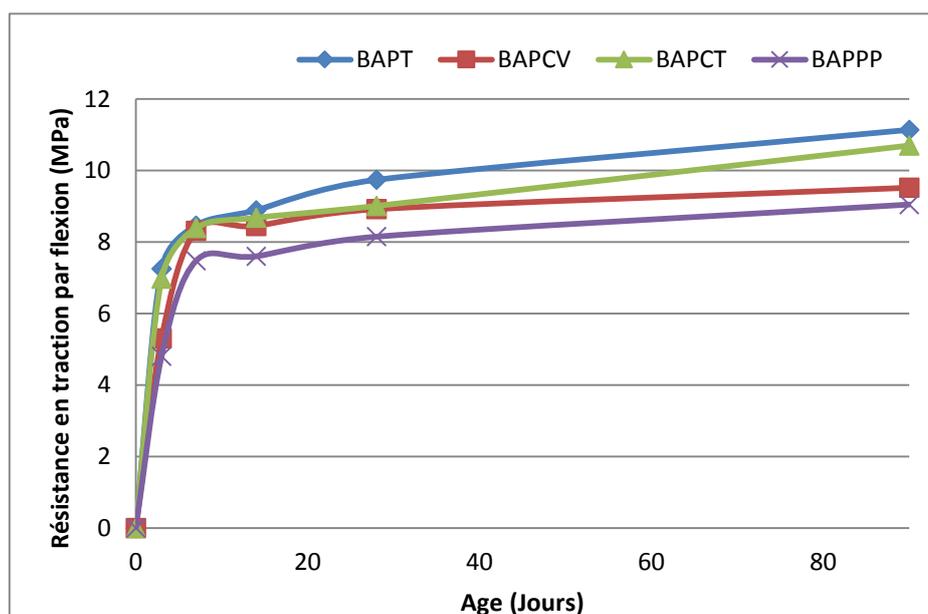


Figure V.12 : Résistances à la traction par flexion sur prisme 7x7 x28 cm

D'après La figure V.12 on remarque que les résistances augmentent avec l'âge de béton, mais cette augmentation est nuancée pour chaque fibre à titre d'exemple les BAPT mentionnent des résistances supérieures par rapport aux autres fibres, précisément au jeune âge. Et après 7 jours, on observe que la résistance de tous les mélanges a tendance d'être constante et presque similaire.

La figure V.13 représente la relation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.

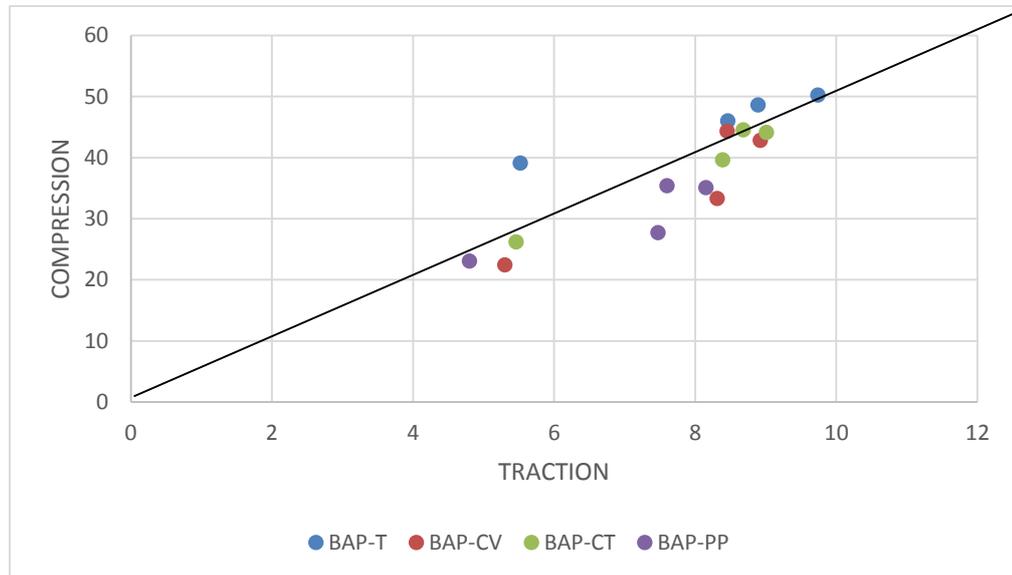


Figure V.13 : corrélation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.

### V.3. Module d'élasticité

L'essai du module d'élasticité a été effectué sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm avec deux échéances (7 et 28 jours) pour avoir le développement de la valeur du module avec le temps.

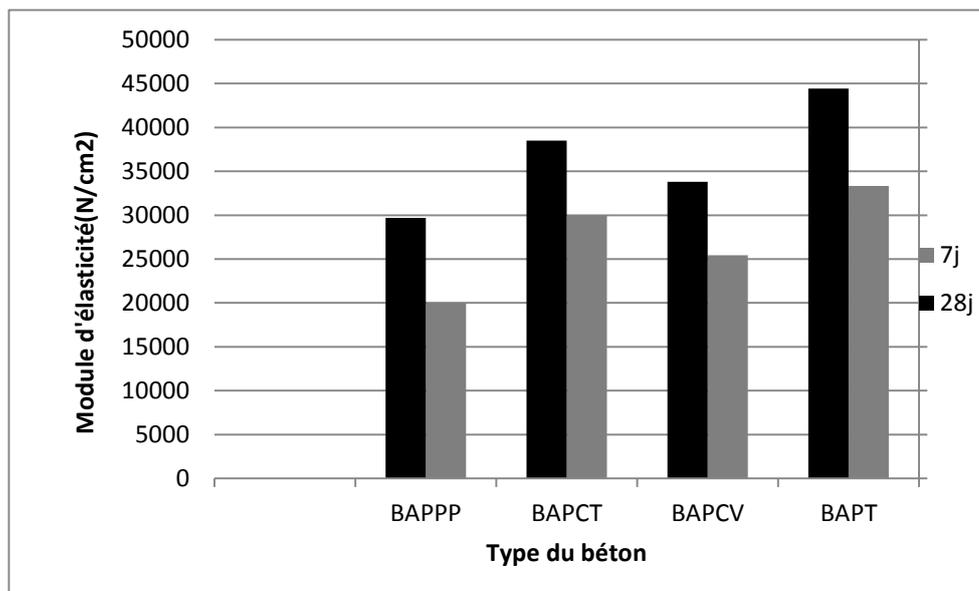
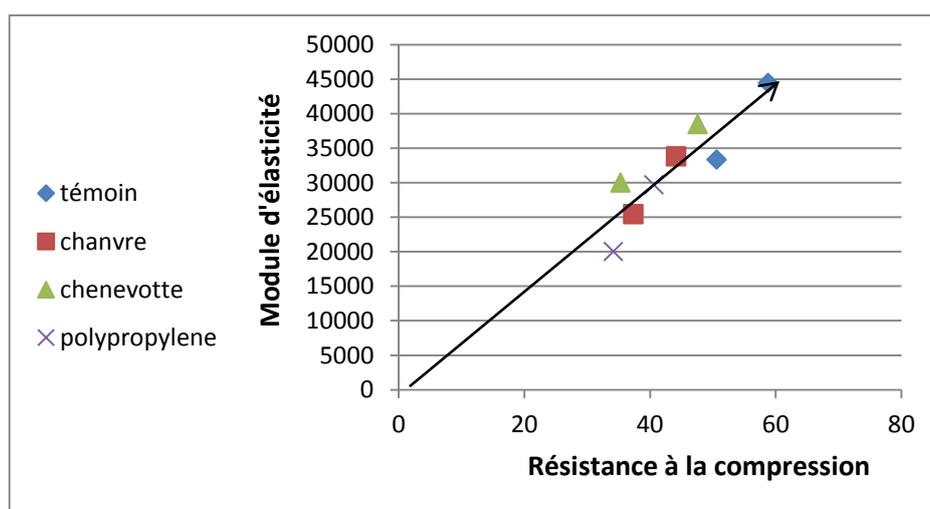


Figure V.14 : Evolution du module d'élasticité des différents types de bétons.

D'après La figure V.14 on constate que le module augmente avec le temps. Mais il est différent d'une fibre à l'autre. On remarque aussi que les BAP avec des fibres donnant des valeurs plus basses que le témoin.

### V.3.1.Relation du module d'élasticité avec la résistance à la compression

La figure V.15 représente la relation entre le module d'élasticité statique avec la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques (10x20).



FigureV.15 : relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.

D'après la figure V.15 ,on remarque qu'il y a une relation croissante entre le module d'élasticité et la résistance à la compression. Mais cette relation est différente suivant le type de mélange et de leur composition.

## V.4.Propriétés des BAPF

Dans cette partie sont regroupés les principaux résultats obtenus à partir du travail expérimental, les résultats des essais de retrait et de la porosité capillaire et le comportement à haute température et de l'attaque sulfatique seront présentés dans les sections suivantes. Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'influence des fibres végétales sur les propriétés des bétons autoplaçants.

### V.4.1.Comportement différé sans charge et perte en poids

Concernant les premières mesures à effectuer, il faut tenir compte que le début des mesures de retrait, servant de référence pour la suite de l'évolution du retrait. Donc, plus on effectue ces mesures tôt, meilleure sera l'estimation des déformations de retraits.

#### V.4.1.1.Retrait total

Le retrait total rassemble le retrait endogène et le retrait de séchage. La figure V.16 montre l'évolution du retrait total pour les quatre mélanges.

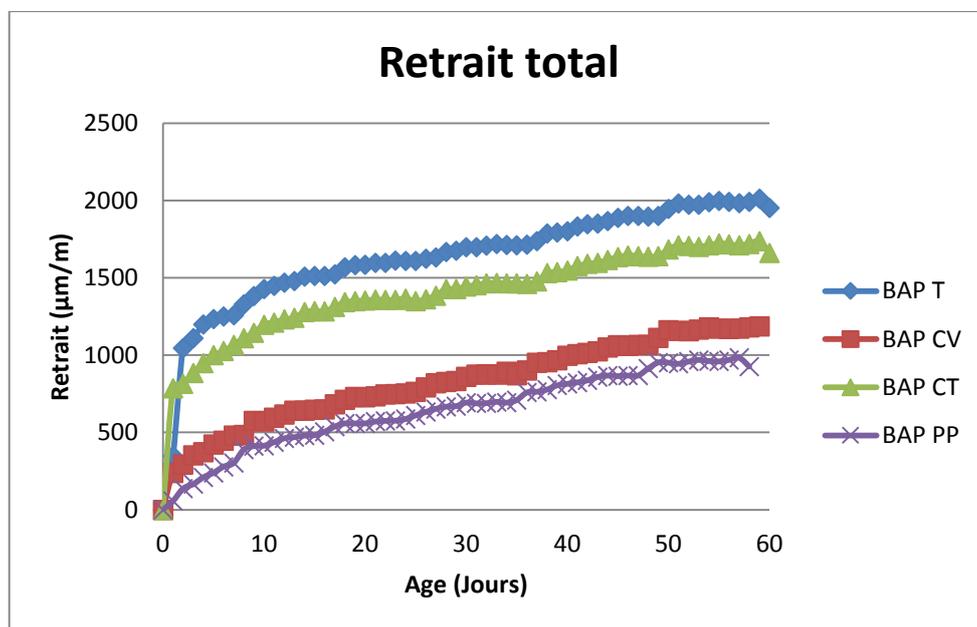


Figure V.16 : l'évolution de la déformation du retrait total des différents bétons.

D'après la figure V.16 on remarque qu'en premier temps, la déformation de retrait est rapide et importante (la cinétique plus forte au jeune âge BAPT et BAPCT par rapport au BAPCV et BAPPP) du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur. Mais par la suite, le séchage étant un processus diffusionnel, sa cinétique devient extrêmement lente. Ces résultats confirment l'hypothèse ceux déjà obtenus par des études de la littérature que les fibres empêchent la variation dimensionnelle. Le tableau suivant montre le pourcentage entre les bétons avec des fibres et le témoin (sans fibre).

Tableau V.8 : le pourcentage entre les bétons avec des fibres et le témoin

Eprouvette	Retrait à 60 jours	Retrait exprimé en pourcentage de l'éprouvette témoin (sans fibre)
BAPT	1992.85	100%
BAPCV	1179.76	59%
BAPCT	1720.29	86%
BAPPP	926.19	46%

#### V.4.1.2. Retrait endogène

Le retrait endogène (auto-dessiccation) en l'absence d'échange hydrique (sans perte de masse) avec milieu ambiant (c'est le cas du comportement au cœur d'une structure massive en béton). Le retrait endogène est la conséquence de la contraction de Chatelier due au fait que le volume des hydrates formés lors de la prise du ciment est d'environ 20% plus faible que le volume du ciment anhydre et de l'eau de départ. La figure V.17 illustre l'évolution du retrait moyen mesurée sur des éprouvettes 7x7x28 cm protégées de la dessiccation en fonction du temps.

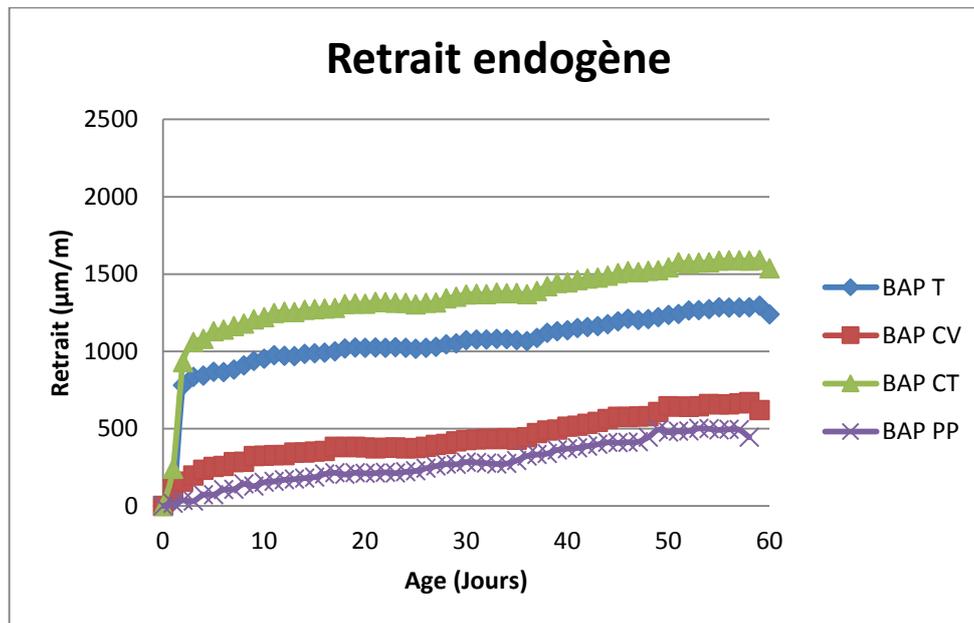


Figure V.17 : l'évolution du retrait endogène des différents bétons avec le temps.

D'après la figure V.17 on note que le BAPT représente un retrait endogène plus élevé par rapport aux autres mélanges. On remarque aussi que le BAPCT donne des valeurs plus élevées que les BAP CV et BAP PP.

Ceci est peut être due au fait que le retrait endogène est un phénomène relatif à l'hydratation du ciment qui confirme de sa cinétique et du volume des hydrates constitués, le volume conséquent d'ajout des fibres dans le BAP semble affecter cette hydratation et aussi le retrait endogène. On rassemble le retrait total et endogène dans la figure V.18.

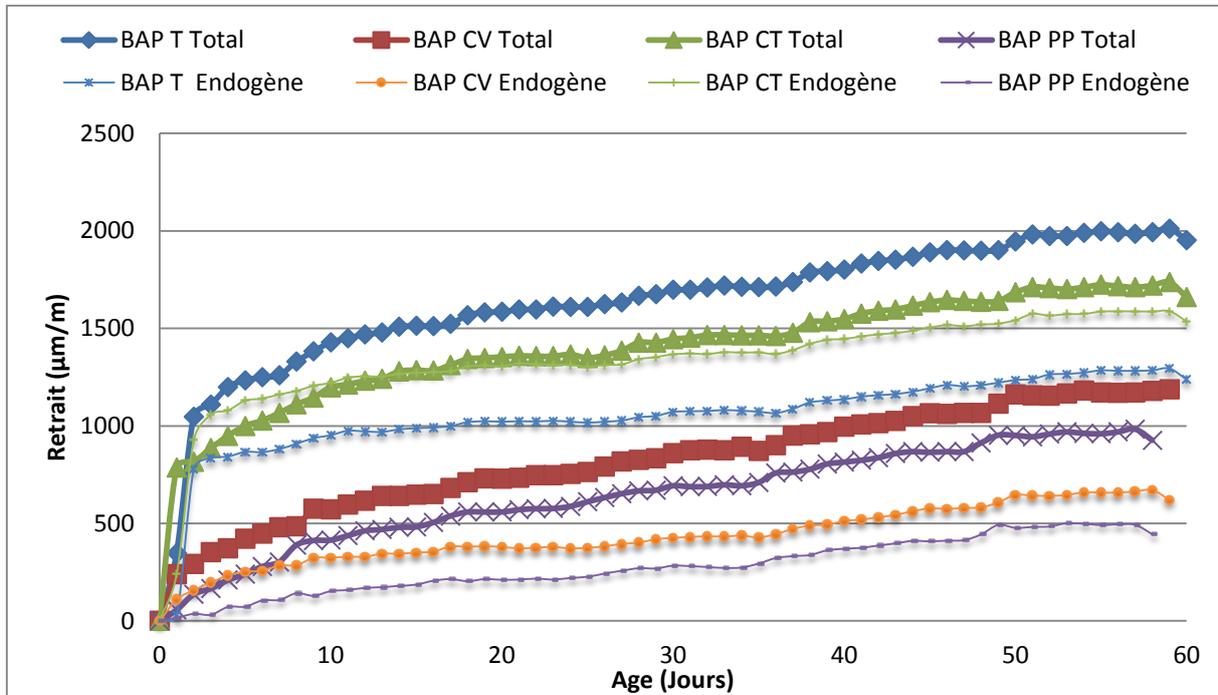


Figure V.18 : évolution du retrait totale et endogène des mélanges bétons autoplaçants.

#### V.4.1.3. Retrait de séchage

Un troisième retrait peut être calculé par différence en estimant qu'il y ait autonomie des phénomènes : le retrait de dessiccation, à partir des retraits (total et endogène) mesurés sur les spécimens.

Ce retrait peut être examiné comme dû seulement à la vaporisation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des faces exposées à l'environnement.

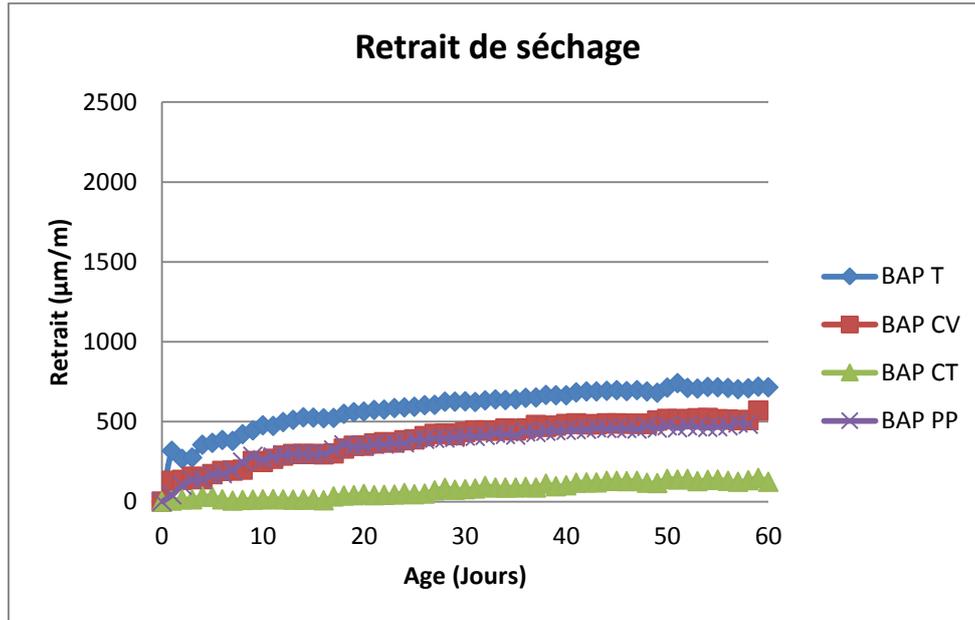


Figure V.19 : Evolution de retrait de séchage des différents bétons

Le retrait de séchage est ou de dessiccation est du lorsqu'il y a déséquilibre hydrique entre l'intérieur du béton durci dont l'hygrométrie de départ est de l'ordre de 75% à 100%, selon le rapport E/C et celle du milieu ambiant (il y a alors une perte de masse). La cinétique du retrait de dessiccation est liée à celle du départ de l'eau et dépend des conditions d'ambiance.

A partir de la figure V.19, on constate que l'ajout des fibres engendre une diminution du retrait de séchage et cette diminution est plus prononcée pour le mélange BAPPP.

#### V.4.1.4. Perte en poids

La figure V.20 montre l'évolution de la perte en poids en fonction du temps.

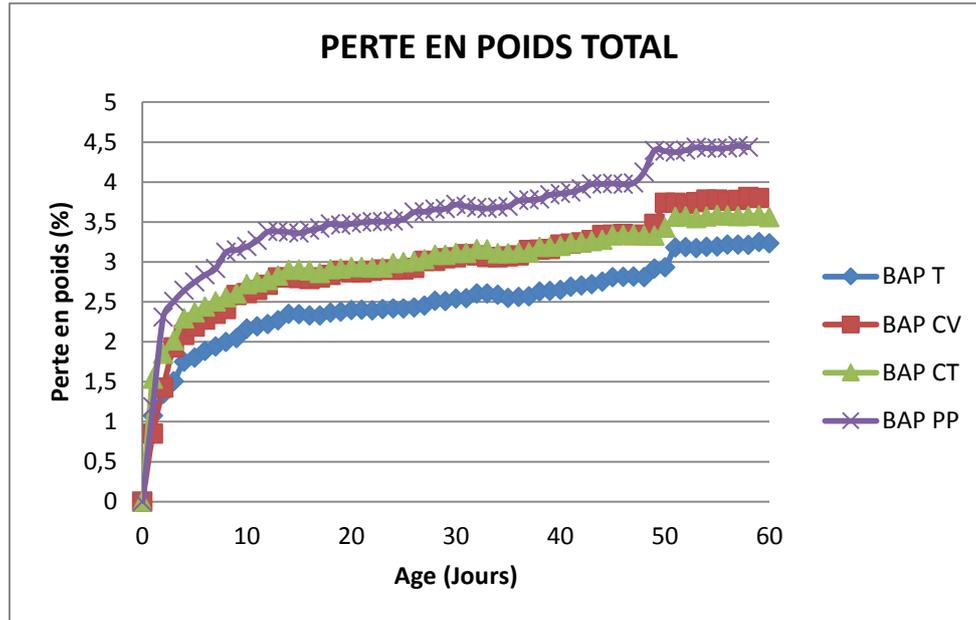


Figure V.20 : Evolution de la perte en poids de différents types de bétons autoplaçants.

Phase I : 3 jours d'âge on constate que les BAP avec des fibres présentent qu'en termes d'amplitude et de cinétique un rapport similaire pour tous les types de bétons.

Phase II : 5~60 jours d'âge on remarque que les BAPF ont subis une perte en poids plus élevée que le témoin.

Les différents résultats, obtenus pour des échantillons de différentes forme et compositions et ainsi de deux modes de conservation indiquent clairement qu'en terme d'amplitude et de cinétique, qu'en premier temps, la cinétique de la variation de la perte en poids croit rapidement dans  $5 \pm 1$  jours et après cette tolérance en observant une diminution de la cinétique.

#### V.4.1.5. Relation entre perte en poids et retrait

Les dernières recherches s'intéressent sur la relation entre la perte en poids et le retrait. Pour atteindre des buts tracés c'est-à-dire les retraits à partir de la perte en poids. Voir ci-contre les figures V.21.

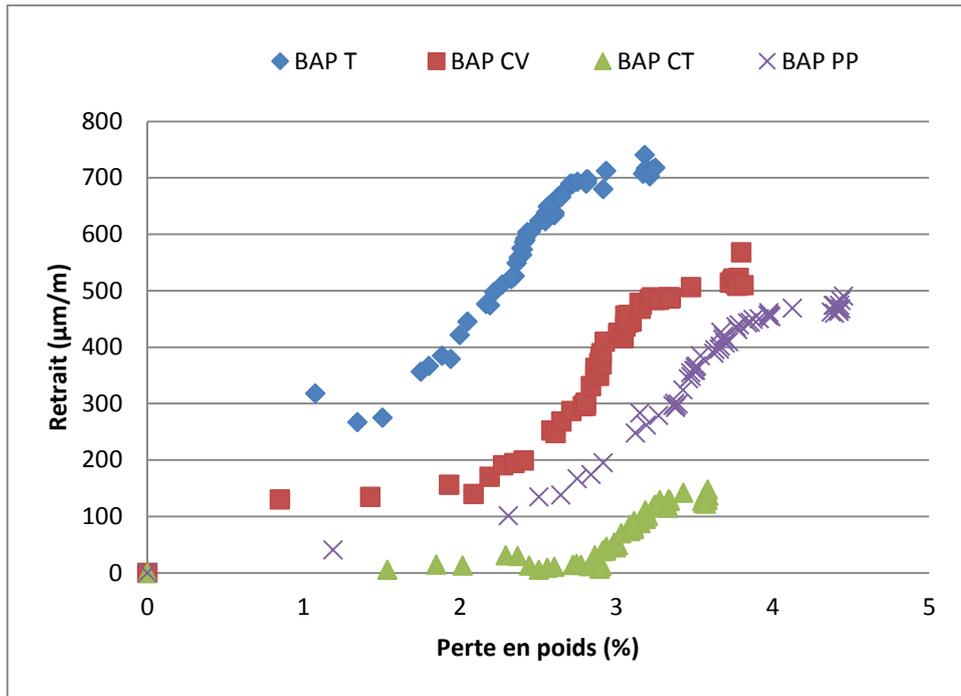


Figure V.21 : la relation entre retrait et perte en poids pour différents types de béton.

On constate qu'il y a un écart important entre les mélanges. Ce phénomène peut s'expliquer soit par le fait que la contraction de la matrice cimentaire devient infinie par épuisement d'eau évaporable, soit par le passage d'un comportement linéaire à un comportement non linéaire sans contrainte hydrique.

## V.2.Comportement thermo-mécanique

### V.2.1.La résistance à la compression résiduelle

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées, cette résistance mécanique a été calculée en conservant une échéance indispensable réglementaire à 28 jours par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cubiques 10x10x10 cm .

Les différents résultats sont présentés dans le tableau (V.9)

Tableau V.9 : comportement des BAPF aux différents cycles

	20°C	110°C	220°C	300°C	600°C
<b>BAPT</b>	31,62	26,97	14,75	29,35	0
<b>BAPCV</b>	38,91	28,65	33,77	37,84	0
<b>BAPCT</b>	37,35	30	31,97	32,29	0
<b>BAPPP</b>	26,23	22,21	25,52	27,11	0

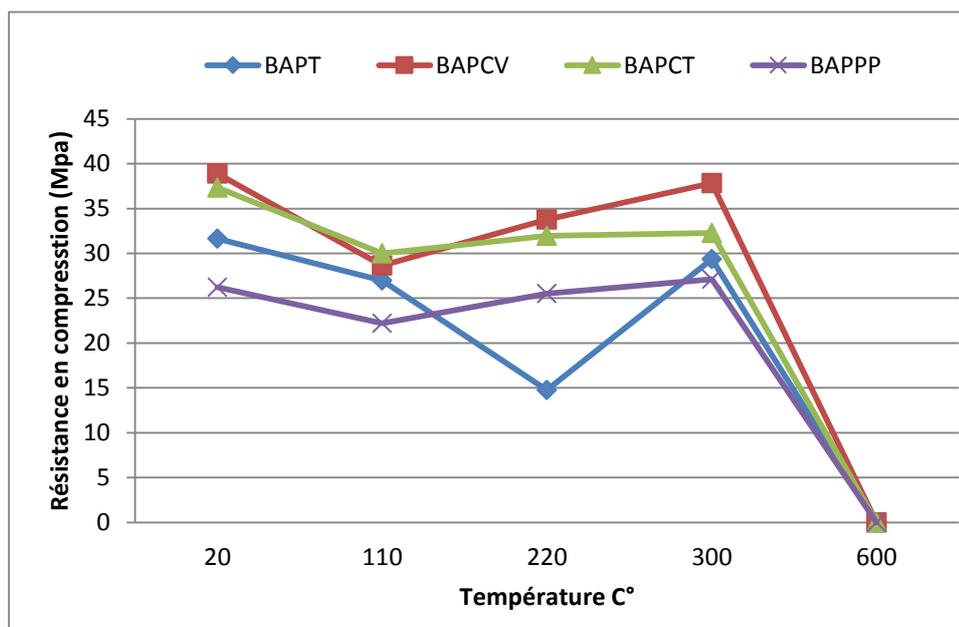


Figure V.22 : évolution de la résistance résiduelle de compression en fonction de la température.

La figure V.22 montre la variation de la résistance résiduelle en compression des différentes formulations étudiées en fonction de la température. On observe une diminution de la résistance de tous les BAP.

La diminution de résistance de tous types de BAPF dans l'intervalle 20 et 110°C est de la même façon avec un pourcentage variant de 14.75% pour BAPT, 26.36% pour BAPCV, et 19.67% BAPCT, et 15.32% BAPPP. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau.



(a)

(b)



(c)

(d)

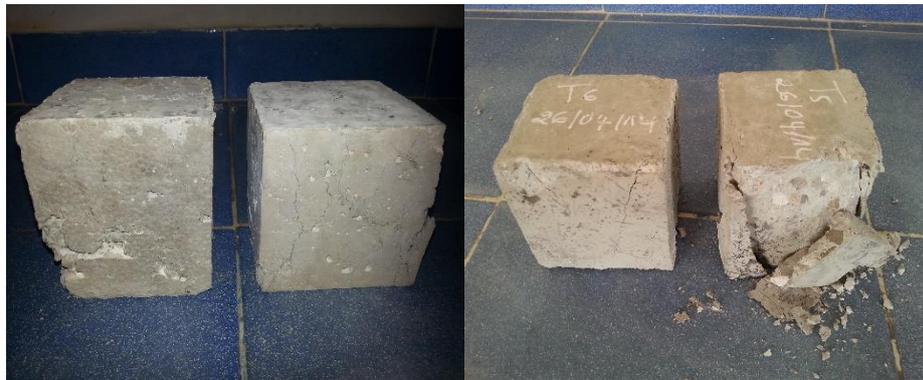
*Figure V.23: éprouvettes cubiques (10×10×10 cm) après cycle 110 °C*

Entre 110 et 220°C ,On observe une augmentation importante de la résistance en compression relative. Cette augmentation de résistance résiduelle représente un gain de (13.21, 14.4 et 2.7) % pour les BAPCV,BAPCT, BAPPP respectivement, par contre le BAPT a continué de baisser de 53.35%,mais cette augmentation de résistance des BAPF paraît grande par rapport au BAPT à cause de départ d'eau – séchage (eau libre) et de fusion de fibre de polypropylène sous une température de 110 -220 °C pour le BAPPP.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.24 : éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 220 °C

Entre 220C° et 300C°, nous observons une augmentation des valeurs de la résistance des BAPF. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Qui attribuent à une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau liée dans les pores et début de déshydratation du CSH. Pour cette raison qu'on a remarqué l'augmentation de résistance avec un pourcentage de 7.17- 2.75- 13.54% (BAPT, BAPCV, BAPCT) respectivement.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.25: éprouvettes cubique ( $10 \times 10 \times 10$  cm) après cycle  $300^\circ\text{C}$

Les observations du comportement des mélanges à la température  $600^\circ\text{C}$  menées que les matériaux chauffés pouvaient présentés, dans certains cas, un comportement explosif. L'éclatement est la résultante des processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et concurrents.

De ce fait, le comportement à l'éclatement présente deux caractères sont, un éclatement hydraulique causé par des pressions internes venant des fluides (vapeur et eau liquide). Le pic de pression intégrerait la pression de vapeur plus la pression induite par la dilatation de la phase liquide saturant une zone (la dilatation propre de l'eau au-dessus de  $160^\circ\text{C}$  est assez importante) et des éclatements dus aux dilatations thermiques empêchées. Celles-ci génèrent des contraintes thermiques très élevées (contraintes de compression parallèles à la surface chauffée), ces contraintes de compression sont relâchées par une rupture fragile du béton, la pression dans les pores ne jouant qu'un rôle secondaire initiateur de l'instabilité. La fissuration empêcherait une mise en pression critique dans le matériau.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.26: éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 600 °C

#### V.4.2.2. Perte en poids résiduelle

Vu l'importance de la partie hydrique dans les phénomènes de transport de chaleur et de masse, nous avons également étudié l'évolution de la perte de masse au cours des essais.

La perte de masse a été obtenue en mesurant la masse de l'éprouvette avant et après le cycle de chauffage pour les différentes éprouvettes, le bilan de masse nous a permis ensuite d'avoir l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.

Tableau V.9 : l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.

	BAPT	BAPCV	BAPCT	BAPPP
110 C°	1,84	2,34	2,26	2,13
220 C°	4,73	5,66	5,08	5,11
300 C°	6,57	6,8	6,65	7,56
600 C°	0	0	0	0

On observe pour un même cycle de température, que la même quantité d'eau est perdue dans les trois BAPF et qu'il n'y a pas une grande différence à la quantité d'eau perdu.

On remarque une perte de masse plus grande dans le deuxième cycle de BAPCV par rapport aux autres mélanges.

Les mêmes résultats qu'on a trouvé pour le troisième cycle mais le BAPPP a eu la plus grande valeur de perte en poids.

On constate que la perte en poids du BAPT est toujours plus faible par rapport au BAPF, cela pourrait s'expliquer par la capacité d'absorption des fibres et la quantité d'ajustement d'eau au moment de coulage.

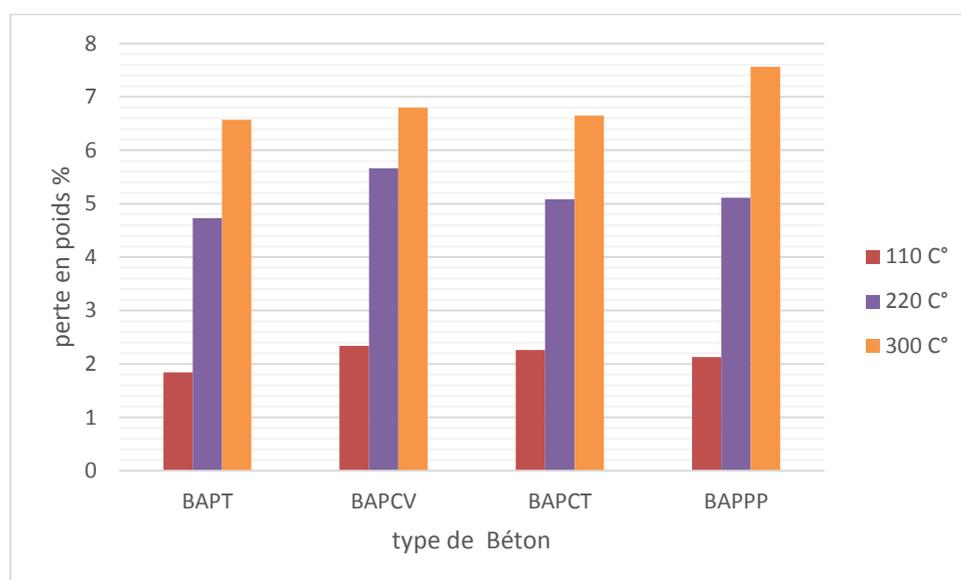


Figure V.27 : évolution de la perte en poids des BAPF en fonction de la température.

#### V.4.3.Porosité capillaire

La porosité accessible à l'eau est une caractéristique microstructurale qui influe sur les propriétés de transfert et sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

Les résultats des porosités accessibles à l'eau des différents BAPF à l'état durci sont donnés sous forme graphique dans la Figure V.28.

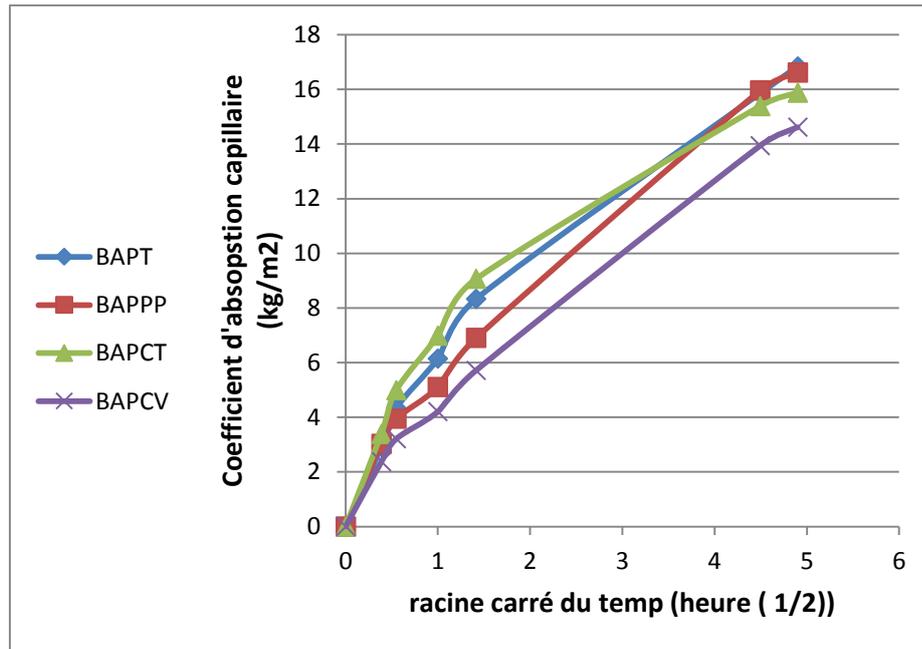


Figure V.28: Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité.

L'influence des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure V.28. Les valeurs de cette figure montre une augmentation de l'absorption avec le temps, est ce pour tous les mélanges. On remarque que le BAPCV est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit, par rapport aux autres mélanges.

## V.5.Durabilité des BAPF(Attaque sulfatique)

### V.5.1.Observation visuelle de dégradation



Figure V.29: les fissures multidirectionnelles après cinq cycles pour les quatre mélanges

En référence de la figure V.29, nous constatons des dégradations apparues après 5 cycles séchage - mouillage dans la solution de sulfate des différents mélanges.

On remarque qu'il y a apparition des fissures multidirectionnelle au niveau des BAPT et BAPCT, mais dans les BAPCV on constate qu'il y a des dégradations au niveau de la couche supérieure.

### V.5.2.Caractéristiques mécaniques

Pour évaluer les performances mécaniques des bétons soumis aux attaques sulfatiques on a effectué des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm pour mesurer la résistance à la compression et des prismes 7x7x28 cm pour mesurer la résistance à la traction par flexion.

#### V.5.2.1.Résistance à la compression

Pour bien définir l'effet de cycle séchage /mouillage (dans le sulfate) on a effectué des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm . Après le cinquième cycle on a fait l'écrasement de deux échantillons pour chaque mélange. La figure V.30 montre l'évolution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles de séchage-mouillage et le témoin (dans l'eau).

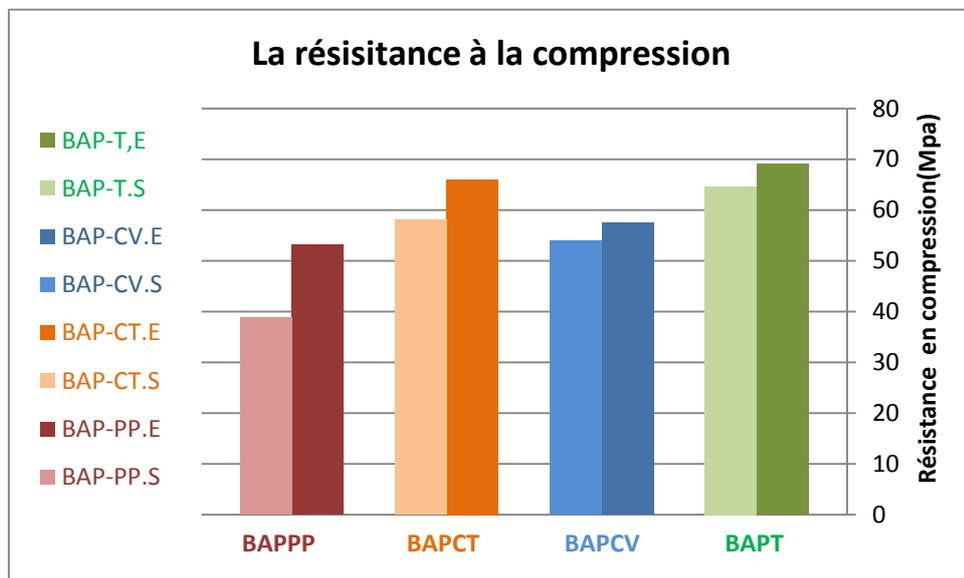


Figure V.30 : l'évolution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles et le témoin (dans l'eau).

D'après la figure V.30, on ne constate que le BAPT qu'après le cinquième cycle de séchage-mouillage, qu'il y a une diminution de la résistance à la compression de 7% par rapport au témoin (dans l'eau). Cette diminution est aussi différente d'un mélange à un autre.

### V.5.2.2. Résistance à la traction par flexion

Pour évaluer la résistance à la traction par flexion on a effectué des éprouvettes prismatique (7x7x28) cm. La figure V.31 montre la variation de la résistance à la traction par flexion de différents types de bétons après cinq cycles de séchage-mouillage et le témoin vierge.

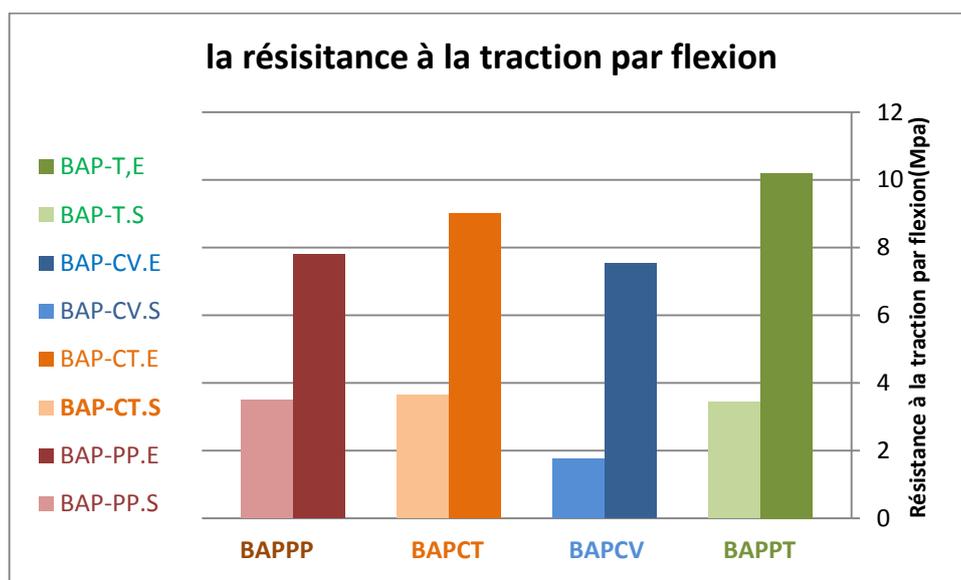


Figure V. 31 : l'évolution de la résistance à la traction par flexion de différents types de bétons après 5 cycles et le témoin (dans l'eau).

D'après la figure V.31, on constate qu'il y a une diminution remarquable de la résistance des échantillons soumis à l'attaque sulfatique combinée avec des cycles séchage-mouillage que les éprouvettes conservées dans l'eau avec un pourcentage de 66%, 59% 76% pour les BAPT, BAPCT, BAPCV respectivement.

Pour cela on conclut que la résistance à la traction est plus sensible que la résistance à la compression à l'attaque agressive.

### V.5.3. Variation dimensionnelle et pondérale

L'importance de l'évolution de l'écoulement d'eau dans les bétons pendant leur cycle séchage- mouillage dans les sulfates, nous a poussé à approfondir nos recherches, quant à la variation de la perte en poids et au retrait.

Des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm ont été effectuées munies de plots pour mesurer l'allongement et la perte en poids de ce dernier. On présentera dans la figure V-32 la variation dimensionnelle après chaque cycle de séchage- mouillage pour les quatre types de mélanges.

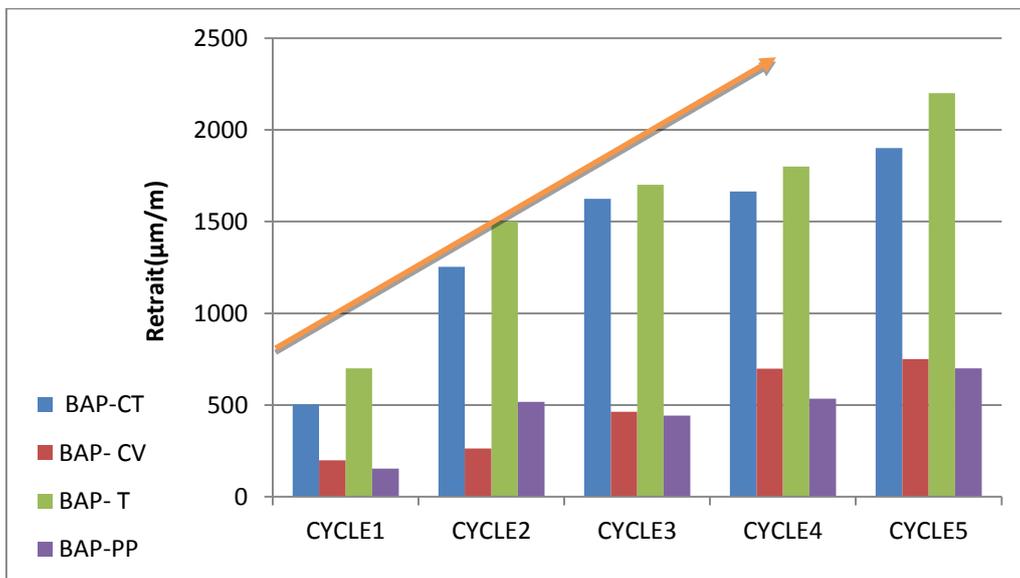


Figure V.32 : Evolution de la variation dimensionnelle suivant les cinq cycles de différents types de bétons.

A partir de cette figure on constate que la variation dimensionnelle augmente après chaque cycle. La remarque qui mérite l'attention que les BAPT subis un gonflement très élevé par rapport aux autres. Ce qui explique qu'il y a des fissures internes et externes qui facilitent le phénomène de diffusion de l'eau de sulfate dans les bétons. Mais les fibres de polypropylène et chanvre ont présenté des valeurs plus basses que le témoin et le chènevotte. Ceci peut s'expliquer que les fibres jouent un rôle d'un obstacle contre le déplacement de l'eau dans le béton.

La figure V.33 représente l'évolution de la perte en poids après cinq cycles séchage - mouillage des différents types du béton.

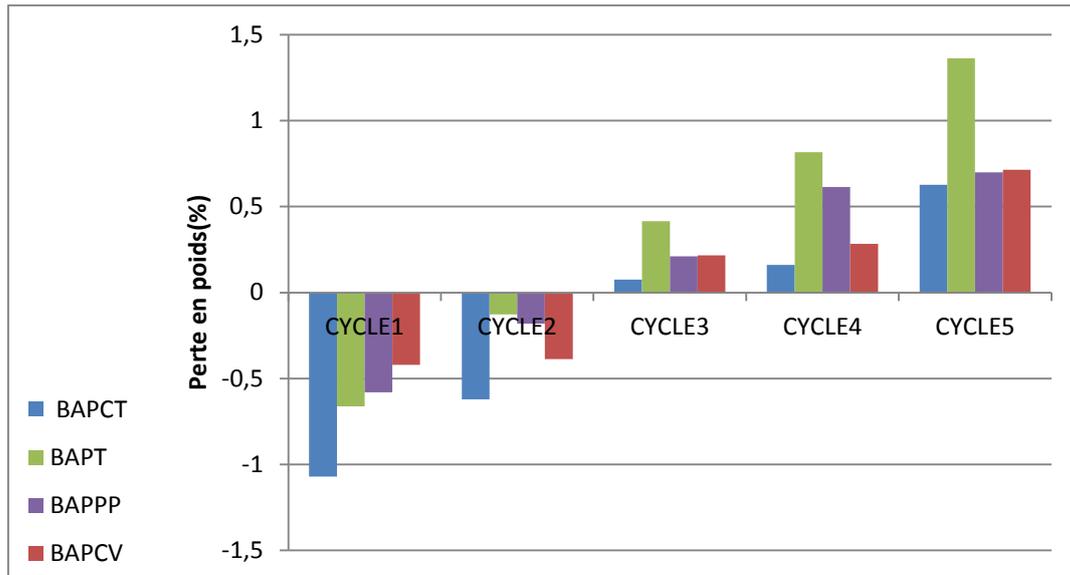


Figure V.33 : Evolution de la perte en poids après cinq cycles séchage - mouillage des différents types de bétons.

D'après la figure V.33 On constate qu'il y a une perte de masse durant les deux premiers cycles surtout BAPCT et BAPT mais dans le troisième cycle on constate qu'il y a un gonflement avec des valeurs différentes d'un mélange à l'autre. A titre exemple le BAPT présente un gain de poids considérable que les autres (BAPF).

## V.6.Conclusion

Dans cette étude les résultats rhéologiques obtenus sur les BAPF, ont révélés que :

- ✓ L'introduction des fibres végétales dans le béton, conduit à une augmentation de la demande en eau, le rapport E/C augmente en augmentant le dosage des fibres. Cependant, la compacité des BAPF diminue systématiquement vue les vides créés par ces fibres.
- ✓ L'évolution de l'ouvrabilité des BAP fibrés diminue, particulièrement aux milieux confinés.
- ✓ Les essais de la stabilité au tamis montrent que tous les mélanges sont stables.

D'autre part, les résultats des propriétés physiques et mécaniques obtenus sur les BAPF, ont montrés que :

- ✓ Les BAP fibrés donnent des résistances à la compression plus faible que le BAP non fibré.

- 
- ✓ Les fibres végétales affectent la porosité et la perméabilité des BAP, en ajoutant les fibres et le BAP devient moins compact.
  - ✓ Les résultats montrent que les BAPF se comportent mieux que BAPT sous l'élévation de la température.
  - ✓ Les fibres limitent le retrait précisément pour le BAPCV et BAPPP.

## V.RESULTATS ET DISCUSSIONS

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats obtenus dans cette recherche et cela pour montrer l'influence de type de fibre sur les propriétés des mélanges à l'état frais afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L, J-ring, V-funnel, stabilité au tamis, air occlus et la densité). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés sur les mêmes mélanges à des échéances précises (performances mécaniques, module d'élasticité).

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aussi à l'influence des fibres sur les variations dimensionnelles dues au retrait, la perte en poids, la porosité capillaire, et de caractériser expérimentalement la réponse des BAP et BAPF sous des conditions extrêmes de haute température, et sous environnement agressif (Attaque sulfatique).

### V.2. Qualification des bétons d'autoplacants

Une liste non exhaustive des essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état frais a été présentée dans la synthèse bibliographique (voir chapitre IV). Cependant, la caractérisation à l'état frais des bétons s'est limitée aux essais suivants : L'étalement au cône, écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis, V funnel, J-Ring, air occlus et la densité.

#### V.2.1. L'essai d'étalement

Le critère d'ouvrabilité pour un BAP, est le critère d'écoulement non confiné représenté par l'essai d'étalement au cône d'Abrams, de plus pour cet essai, le temps d'écoulement T50 a été mesuré.

Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau V.1.

*Tableau V. 1: Les résultats de l'essai de l'étalement.*

	BAPT	BAPCTT	BAPCV	BAPPP
Etalement (cm)	73	71.5	65.5	61
T50 (s)	2	2.07	2.4	2.62

Plusieurs observations peuvent être faites sur les résultats d'étalement de nos bétons :

- L'étalement spécifié était respectivement compris entre 61 et 73 cm.
- Les résultats obtenus montrent que tous les bétons (BAPT, BAPCV, BAPCT et BAPPP) ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP, d'après les recommandations de l'AFGC [10].
- Le temps mesuré (T50) pour atteindre une galette de 50 mm de diamètre des différents bétons sont dans l'intervalle de 2-5 s ce qui signifie les limites inférieures et supérieures du temps T50.
- Nous constatons que le BAPT a un étalement de 2% de plus par rapport au BAPCT et de 10% de plus par rapport au BAPCV et de 16% par rapport au BAPPP. Cela approuve que l'introduction des fibres dans les bétons affecte la maniabilité.

La figure V.1 montre la relation entre l'étalement et le T50.

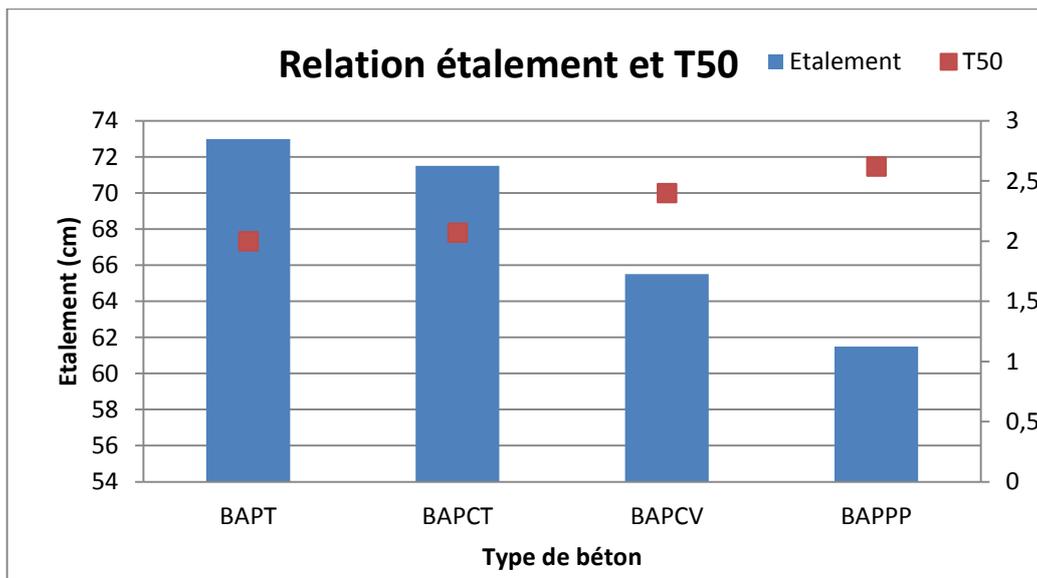


Figure V.1 : Relation entre l'étalement et T50.

D'après la figure V.1, on constate que plus l'étalement augmente le temps d'écoulement diminue, ou en d'autre terme l'augmentation de fluidité entraîne une diminution de la viscosité.

La figure V.2 représente les galettes obtenues au cours de l'essai d'étalement du BAPT et BAPCT.

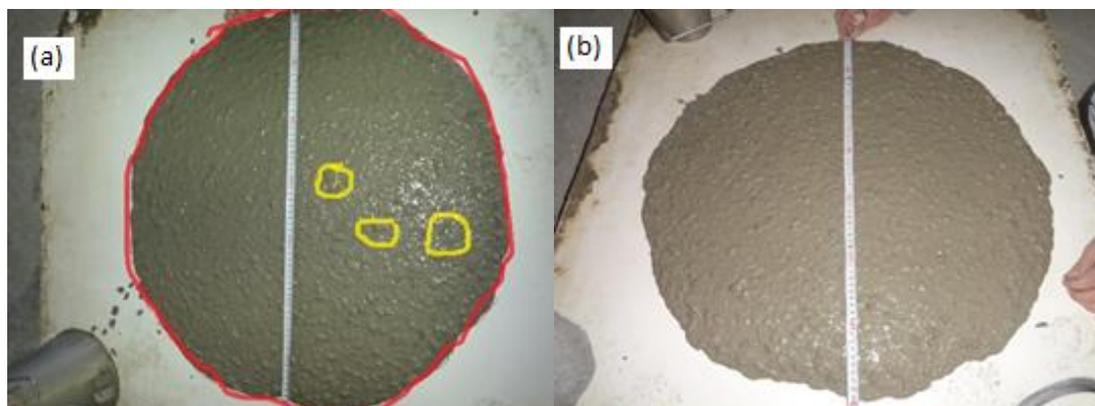


Figure V.2. : Les galettes obtenues au cours de l'essai d'étalement du (a) BAPT et (b) BAPCT

-Pour les compositions des BAPT, BAPCT, BAPCV, l'aurole de laitance à la périphérie des galettes de béton était très faible. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton. Par contre pour le BAPPP, on observe qu'il y a une accumulation des gros granulats au centre de la galette par une formation d'une auréole de laitance à ses extrémités.

### V.2.2. Mobilité en milieu confiné

Deux essais ont été effectués pour avoir la mobilité des bétons en milieu confiné, l'essai de la boîte en L et l'essai de j-Ring.

- **l'essai de la Boîte en L**

Les résultats de l'essai de la Boîte en L des différents bétons sont résumés dans le tableau V.2 :

Tableau V.2: Les résultats du rapport H2/H1

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCT	BAPPP
Essai de la boîte en L	0.91	1	0.9	0.45

La figure V.3 représente les résultats de la boîte en L des quatre bétons :

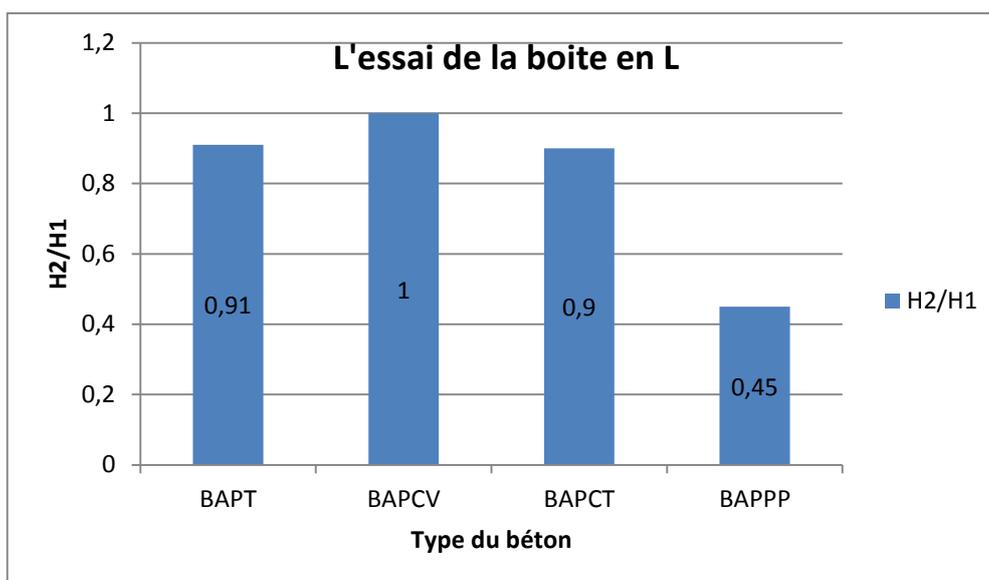


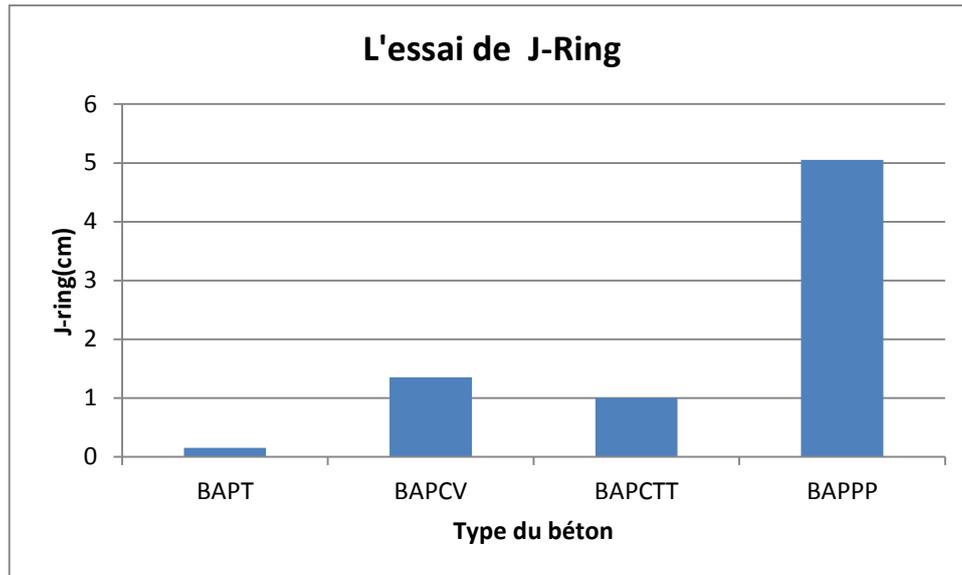
Figure V.3: Les résultats de l'essai de la boîte en L

- **L'essai J-Ring**

Les résultats de L'Essai de J-ring des différents bétons sont résumés dans le tableau V.3 :

Tableau V.3: Les résultats de l'essai de J-Ring

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPPP
Essai J-Ring (cm)	0.15	1.35	1	5.05



*Figure V.4: Les résultats de l'essai de J-Ring*

La figure V. 5 représente la mobilité des BAPT, BAPCT, BAPCV au milieu confiné (essai de la boîte en L et essai du J-Ring).



*Figure V.5 : La mobilité des BAPT, BAPCT, BAPCV au milieu confiné*

Pour les deux essais Les résultats obtenus sont conforme à ce que l'on peut attendre d'un BAP. Cependant, le plus important dans cet essai est que le béton testé s'écoule à travers les armatures correctement. Sur ce point, aucun problème n'est à signaler pour les BAPT, BAPCT, BAPCV.

Par contre, il a été remarqué que le BAPPP a rencontré des grandes difficultés lors de l'écoulement dans un milieu confiné comme le montre la figure V.6.



Figure V.6 : Blocage de BAPPP

### V.2.3.L'essai V-Funnel

Les résultats de l'essai de V-funnel sont résumés dans le tableau V.4 :

Tableau V.4: Les résultats de l'essai de V-funnel

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPP
Le temps d'écoulement (s)	8.44	9.39	8.73	10.47

La figure V. 7 illustre les résultats de l'essai V-Funnel.

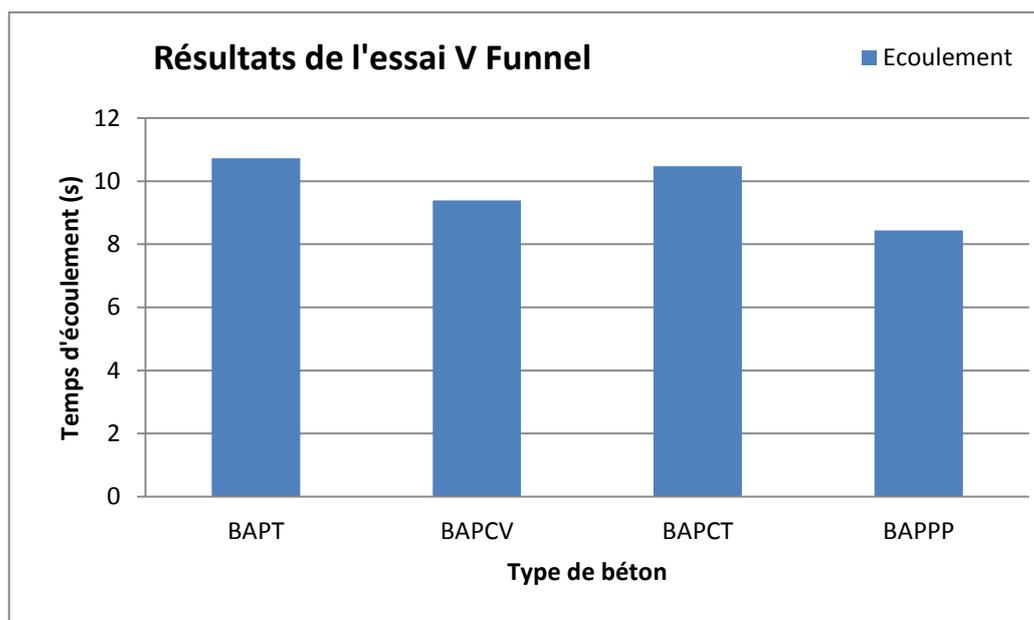


Figure V.7 : Les résultats de l'essai V-funnel.

D'après la figure V. 7 on constate que le temps d'écoulement mesuré par l'entonnoir était respectivement compris entre 9 et 25 s et se rapproches à des valeurs couramment rencontrées (dans les fourchettes de l'AFGC) (voir tableau V.4).

#### V.2.4. L'essai de Stabilité au tamis

La figure V. 8 représente les résultats de l'essai de stabilité au tamis.

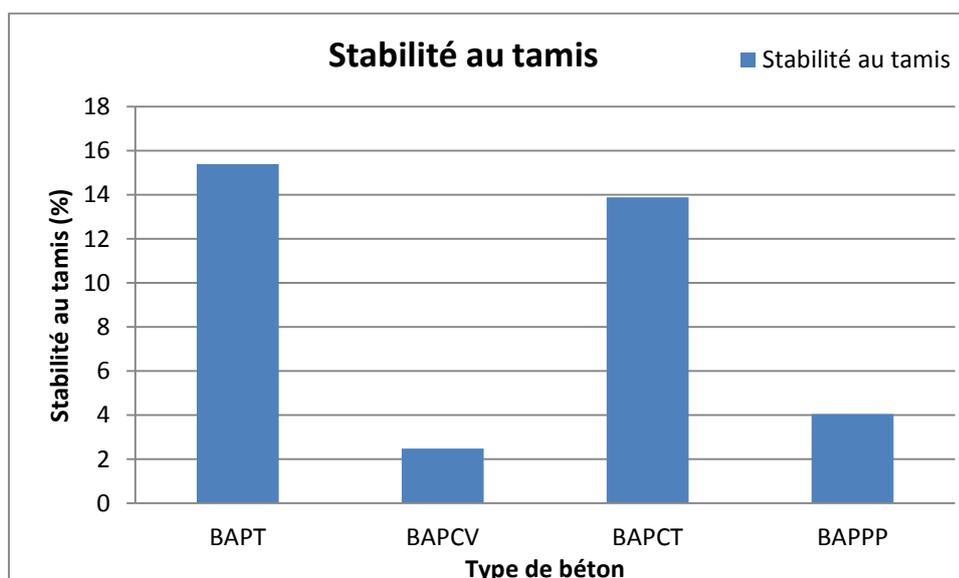
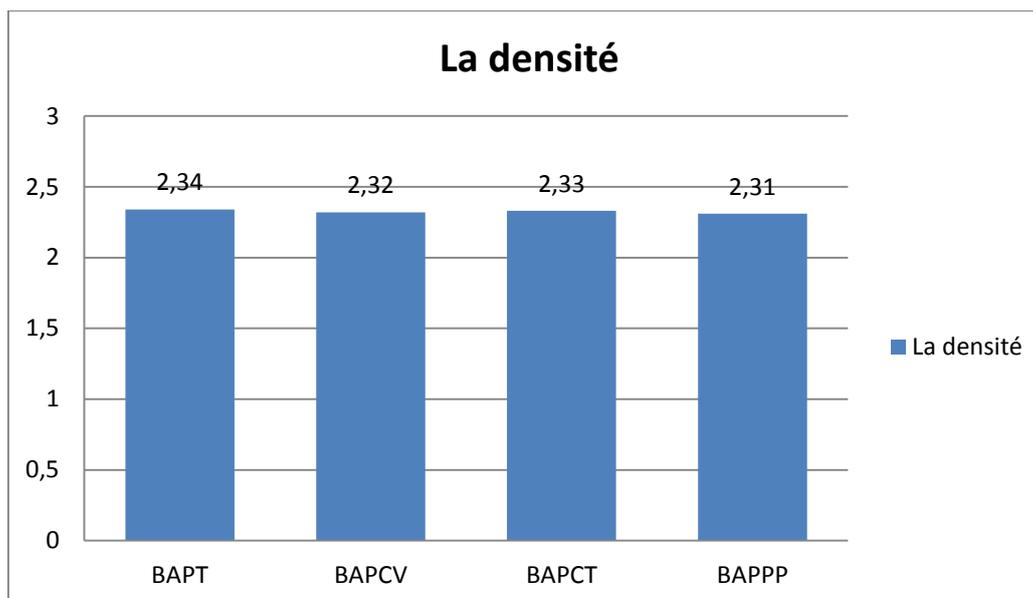


Figure V.8 : Stabilité au tamis

Selon la norme (NF EN 12350-11) la valeur de stabilité au tamis, qui décrit la résistance à la Ségrégation, est fondamentale pour l'homogénéité et la qualité du BAP. Tous nos bétons ont un taux de ségrégation inférieur à 15% synonyme d'une stabilité correcte.

### V.2.5. La densité

La figure V. 9 illustre les résultats de la densité.



FigureV.9 : Valeur de la densité.

D'après la figure V.9 on constate que les résultats de tout les BAP sont très proches de l'un à l'autre.

### V.2.6. L'air Occlus

Le tableau V.5 regroupe les résultats de l'essai de l'air occlus effectués.

Tableau V.5: Les résultats de l'air occlus

Béton	BAPT	BAPCV	BAPCTT	BAPPP
Air occlus (%)	1.9	2.1	1.45	1.27

La figure V.10 représente les résultats de l'essai de l'air occlus des quatre mélanges (BAPT, BAPCV, BAPCT, BAPPP).

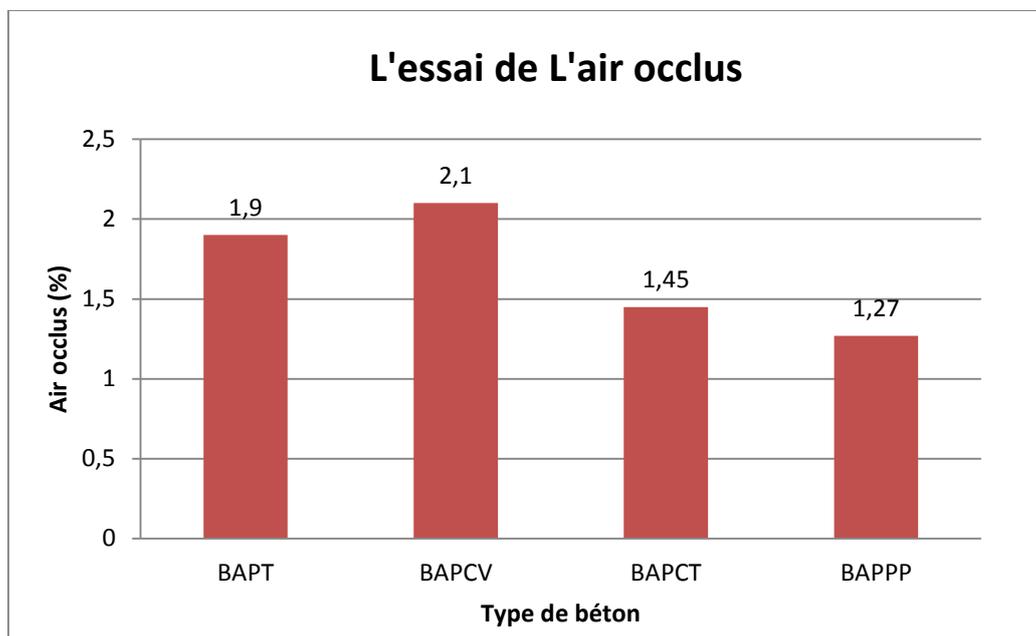


Figure V.10 : L'essai de l'air occlus.

D'après la figure V.10 on remarque que la teneur en air des BAPCT et BAPPP presque identique et la teneur en air de BAPCV est plus élevée de 30,95 %, 39,52% par rapport au BAPCT et BAPPP respectivement.

### V.3.Caractérisation mécanique des BAPF

Pour chacun des mélanges énumérés dans le tableau, On a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- la résistance à la compression cylindrique (10x20) cm à 3, 7, 14, 28 et 90 jours.
- la résistance à la traction par flexion prisme (7x7x28) à 3, 7,14, 28 et 90 jours.

#### V.3.1.Résistance à la compression

L'évolution de la résistance à la compression des BAPT, BAPCV, BAPCT, BAPPP a été mesuré au cours du temps sur des éprouvettes 10x20 cm. Les valeurs moyennes des résistances à la compression sont données dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : Résistances à la compression sur cylindres (10x20) en Mpa.

Résistance à la compression (10×20) cm					
Béton	3 jrs	7 jrs	14 jrs	28 jrs	90 jrs
BAPT	39,15	46,06	48,3	50,29	59,2
BAPCV	22,49	33,35	44,37	42,86	44,74
BAPCT	26,24	39,65	44,59	44,15	54,38
PAPPP	23,09	27,76	35,43	35,13	40,2

La figure V.11 montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du BAP pour différents fibres.

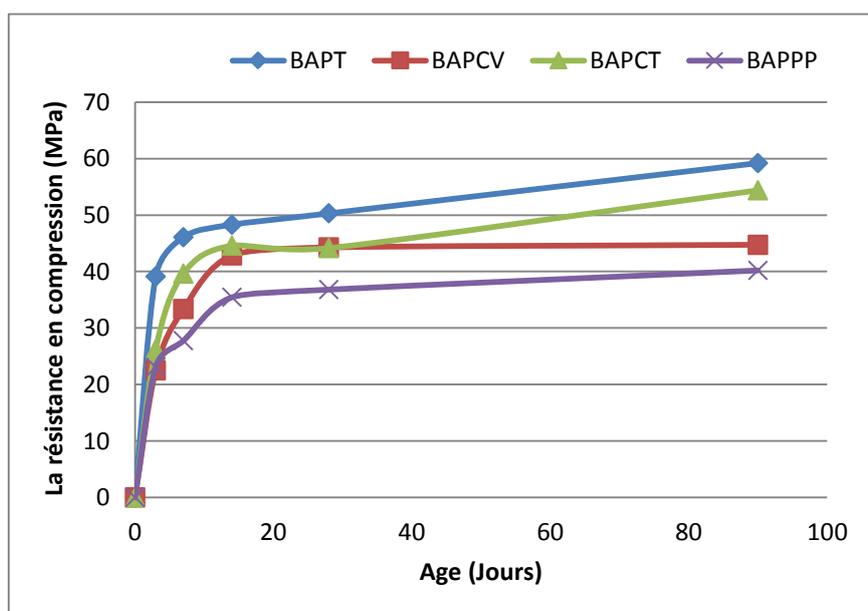


Figure V.11 : Résistance à la compression des éprouvettes cylindriques (10x20) cm.

D'après la figure V.11, on remarque que la cinétique de l'évolution de la résistance à la compression des différents types du béton est différente, à titre d'exemple, on remarque que les fibres de polypropylène n'ont pas une grande influence sur le béton auto-plaçant et n'améliorent pas la résistance à la compression. Pour les deux résultats des fibres (chanvre, chènevotte) on constate qu'à jeune âge les résultats sont plus bas que le témoin (retard de

prise) et cela est confirmé par la littérature [46], puisque la matière cellulosique qui se trouve dans les végétations joue un rôle de retardateur de prise.

Aussi et d'après la littérature l'ajout des fibres végétales au béton n'a aucun effet bénéfique sur la résistance à la compression. Cela est expliqué par le fait que l'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire augmente la porosité, et donc une diminution de la compacité, d'où une diminution de la résistance à la compression.

On remarque, concernant la cinétique résistance –âge Entre fibre et fibre à titre d'exemple on observant qu'entre 3 et 7 jours il y a une petite évolution pour le polypropylène (17%). par contre les fibres de chanvre et de chènevotte présentent une évolution considérable respectivement (32,56%), (33,82%). Entre 7 et 14 jours on remarque que les résistances des BAPPP et BAPCV ont continué d'augmenter en résistance alors que les BAPCT a tendance de stabiliser.

Donc, on peut conclure que :

-Les résistances à la compression des BAP fibrés sont systématiquement plus faibles que celles du BAP non fibré(BAPT).

-En considérant les résultats obtenus par diverses fibres, le plus édifiant est la performance acquise par le chènevotte.

-L'introduction de la fibre végétale dans le BAP n'améliore pas la résistance à la compression, ni au jeune âge ni au moyen terme.

La résistance mécanique des BAP fibrés diminue significativement. Cette diminution est imputée à un rapport E/L plus élevé.

### **V.3.2.Résistance à la traction par flexion**

L'évolution de la résistance à la traction par flexion des BAPT, BAPCV, BAPCT et BAPPP a été mesuré au cours du temps sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm. Les valeurs moyennes des résistances sont données dans le tableau V.7.

Tableau V.7. Résistances à la traction par flexion sur prismes 7x7x28 cm(Mpa)

Résistance à la traction par flexion (7×7x28) cm (Mpa)					
Béton	3 jrs	7 jrs	14 jrs	28 jrs	90 jrs
BAPT	5,52	8,46	8,89	9,74	11,14
BAPCV	5,3	8,31	8,45	8,92	9,52
BAPCT	5,46	8,39	8,68	9,01	10,7
BAPPP	4,8	7,47	7,6	8,15	9,05

La figure V.12 montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge du BAP pour différents fibres.

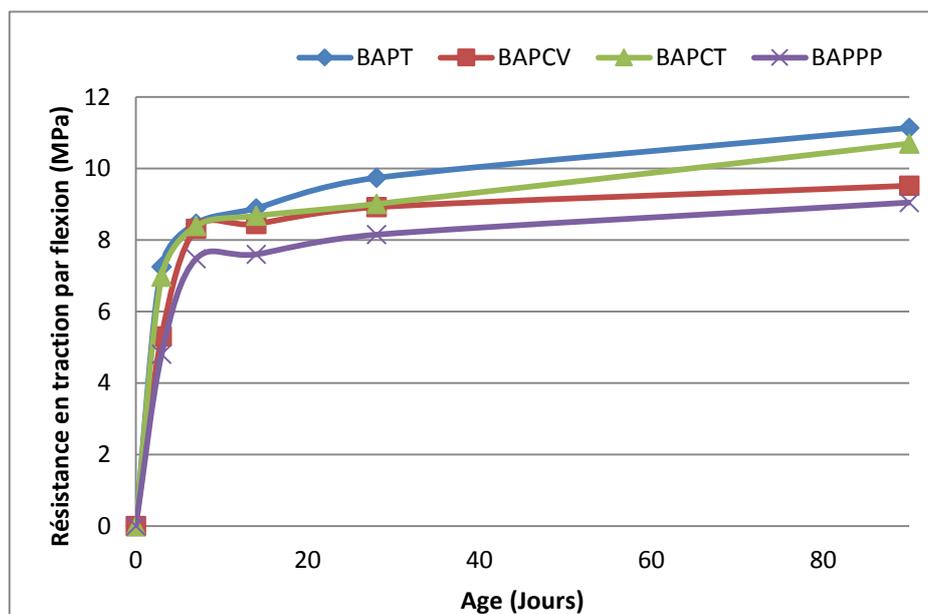


Figure V.12 : Résistances à la traction par flexion sur prisme 7x7 x28 cm

D'après La figure V.12 on remarque que les résistances augmentent avec l'âge de béton, mais cette augmentation est nuancée pour chaque fibre à titre d'exemple les BAPT mentionnent des résistances supérieures par rapport aux autres fibres, précisément au jeune âge. Et après 7 jours, on observe que la résistance de tous les mélanges a tendance d'être constante et presque similaire.

La figure V.13 représente la relation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.

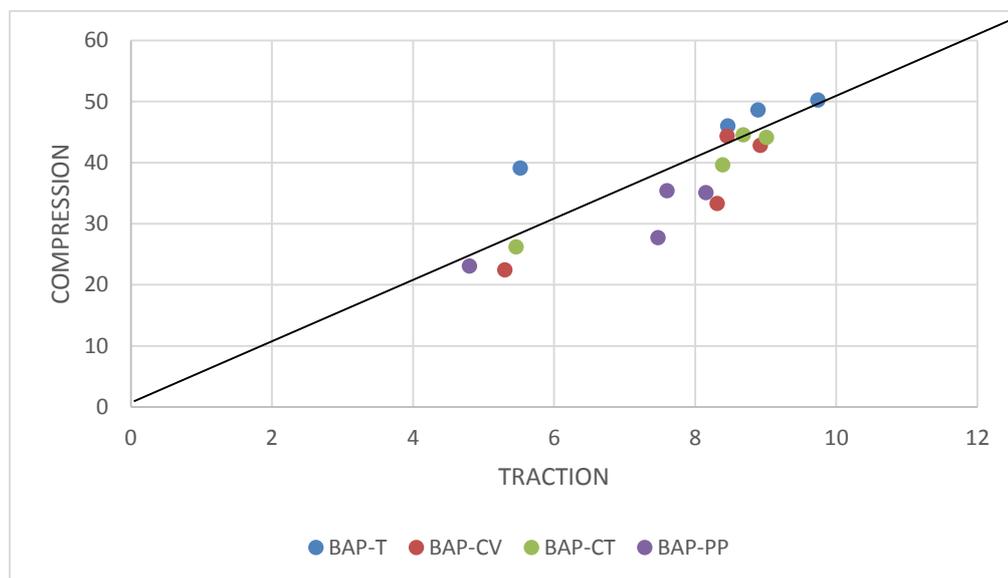


Figure V.13 : corrélation entre la résistance à la compression et la traction par flexion.

### V.3.3. Module d'élasticité

L'essai du module d'élasticité a été effectué sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm avec deux échéances (7 et 28 jours) pour avoir le développement de la valeur du module avec le temps.

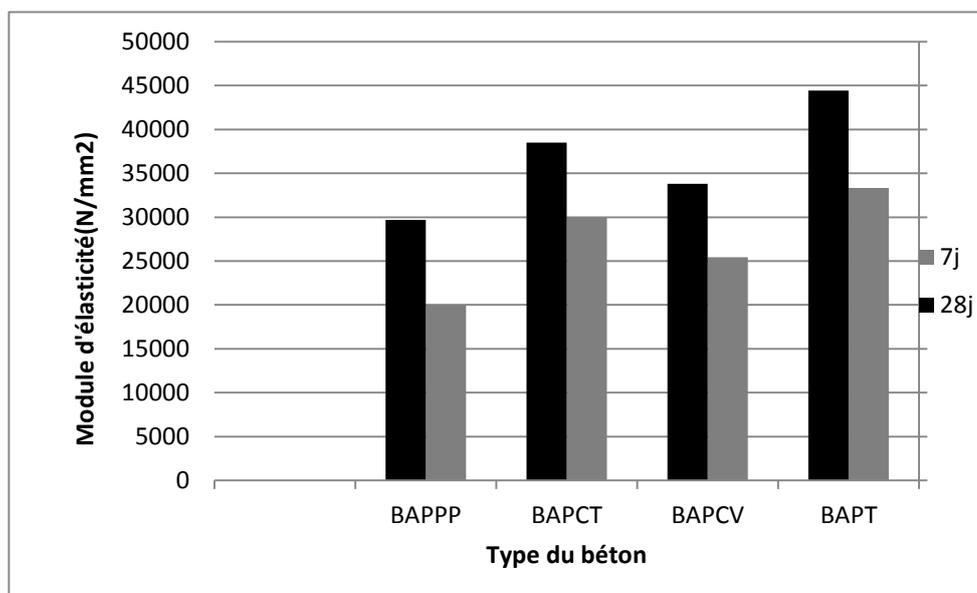


Figure V.14 : Evolution du module d'élasticité des différents types de bétons.

D'après La figure V.14 on constate que le module augmente avec le temps. Mais il est différent d'une fibre à l'autre. On remarque aussi que les BAP avec des fibres donnant des valeurs plus basses que le témoin.

### V.3.4. Relation du module d'élasticité avec la résistance à la compression

La figure V.15 représente la relation entre le module d'élasticité statique avec la résistance à la compression des éprouvettes cylindriques (10x20).

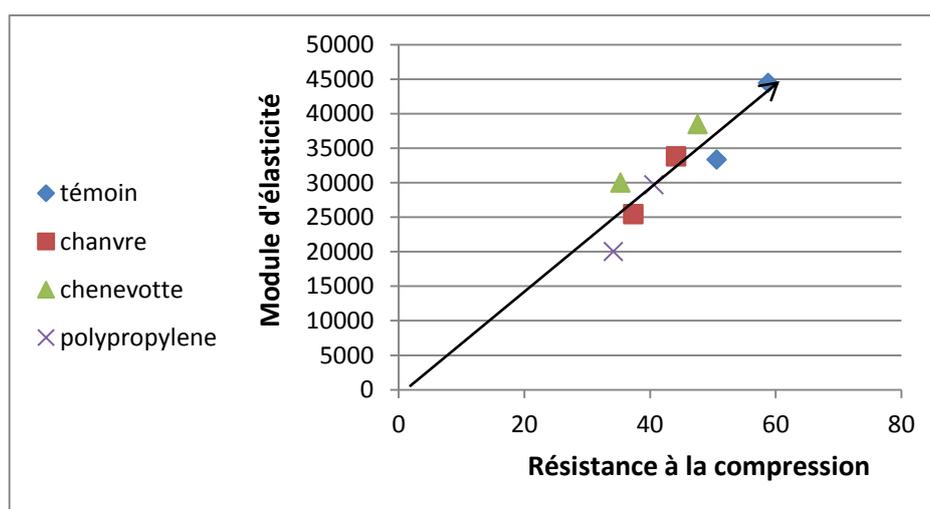


Figure V.15 : relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression.

D'après la figure V.15 ,on remarque qu'il y a une relation croissante entre le module d'élasticité et la résistance à la compression. Mais cette relation est différente suivant le type de mélange et de leur composition.

## V.4. Propriétés des BAPF

Dans cette partie sont regroupés les principaux résultats obtenus à partir du travail expérimental, les résultats des essais de retrait et de la porosité capillaire et le comportement à haute température et de l'attaque sulfatique seront présentés dans les sections suivantes. Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'influence des fibres végétales sur les propriétés des bétons autoplaçants.

### V.4.1. Comportement différé sans charge et perte en poids

Concernant les premières mesures à effectuer, il faut tenir compte que le début des mesures de retrait, servant de référence pour la suite de l'évolution du retrait. Donc, plus on effectue ces mesures tôt, meilleure sera l'estimation des déformations de retraits.

#### V.4.1.1. Retrait total

Le retrait total rassemble le retrait endogène et le retrait de séchage. La figure V.16 montre l'évolution du retrait total pour les quatre mélanges.

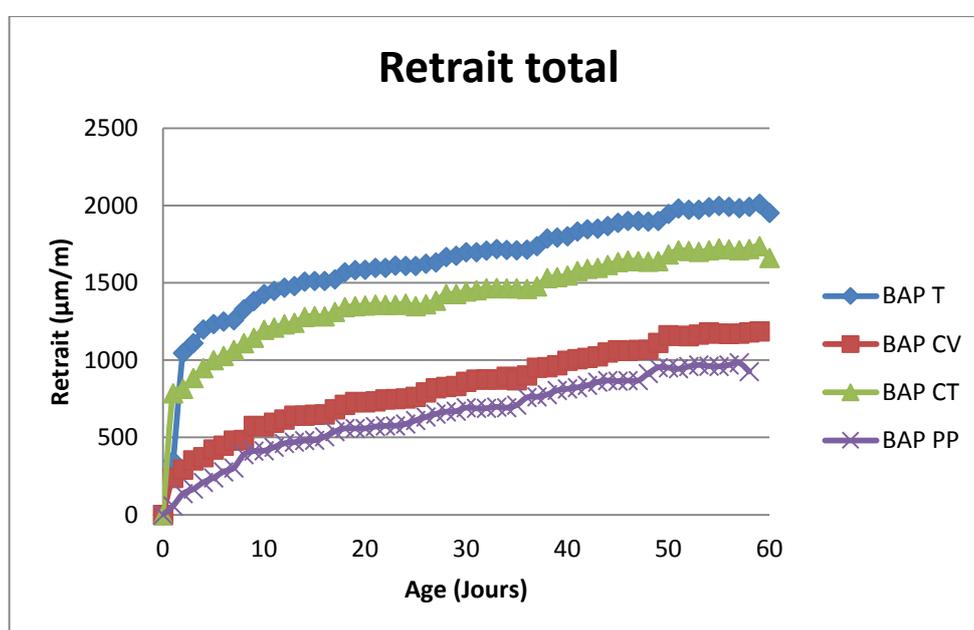


Figure V.16 : l'évolution de la déformation du retrait total des différents bétons.

D'après la figure V.16 on remarque qu'en premier temps, la déformation de retrait est rapide et importante (la cinétique plus forte au jeune âge BAPT et BAPCT par rapport au BAPCV et BAPPP) du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur. Mais par la suite, le séchage étant un processus diffusionnel, sa cinétique devient extrêmement lente. Ces résultats confirment l'hypothèse ceux déjà obtenus par des études de la littérature que les fibres empêchent la variation dimensionnelle. Le tableau suivant montre le pourcentage entre les bétons avec des fibres et le témoin (sans fibre).

Tableau V.8 : le pourcentage entre les bétons avec des fibres et le témoin

Eprouvette	Retrait à 60 jours	Retrait exprimé en pourcentage de l'éprouvette témoin (sans fibre)
BAPT	1992.85	100%
BAPCV	1179.76	59%
BAPCT	1720.29	86%
BAPPP	926.19	46%

#### V.4.1.2. Retrait endogène

Le retrait endogène (auto-dessiccation) en l'absence d'échange hydrique (sans perte de masse) avec milieu ambiant (c'est le cas du comportement au cœur d'une structure massive en béton). Le retrait endogène est la conséquence de la contraction de Chatelier due au fait que le volume des hydrates formés lors de la prise du ciment est d'environ 20% plus faible que le volume du ciment anhydre et de l'eau de départ. La figure V.17 illustre l'évolution du retrait moyen mesurée sur des éprouvettes 7x7x28 cm protégées de la dessiccation en fonction du temps.

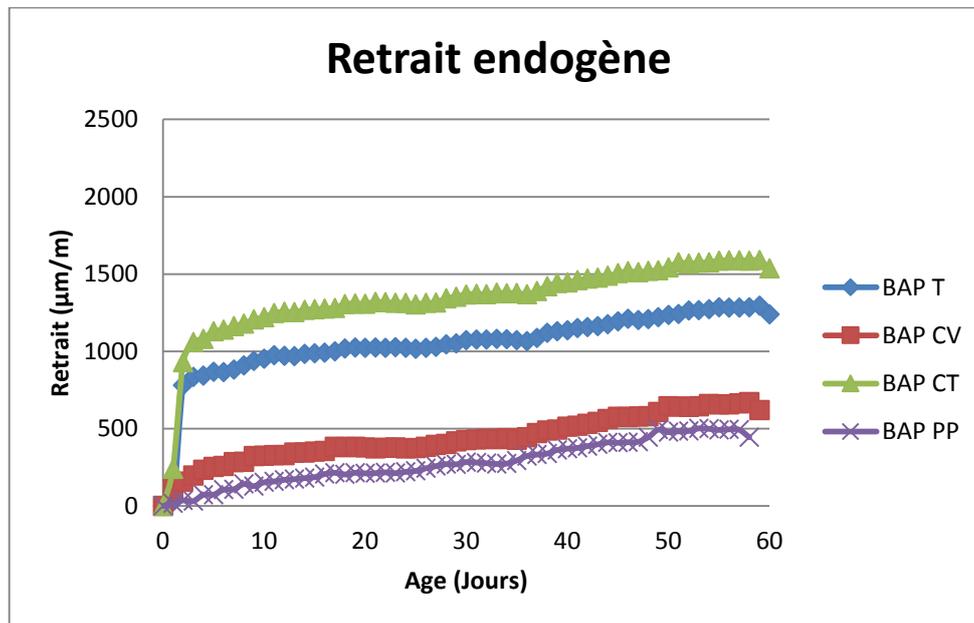


Figure V.17 : l'évolution du retrait endogène des différents bétons avec le temps.

D'après la figure V.17 on note que le BAPT représente un retrait endogène plus élevé par rapport aux autres mélanges. On remarque aussi que le BAPCT donne des valeurs plus élevées que les BAP CV et BAP PP.

Ceci est peut être due au fait que le retrait endogène est un phénomène relatif à l'hydratation du ciment qui confirme de sa cinétique et du volume des hydrates constitués, le volume conséquent d'ajout des fibres dans le BAP semble affecter cette hydratation et aussi le retrait endogène. On rassemble le retrait total et endogène dans la figure V.18.

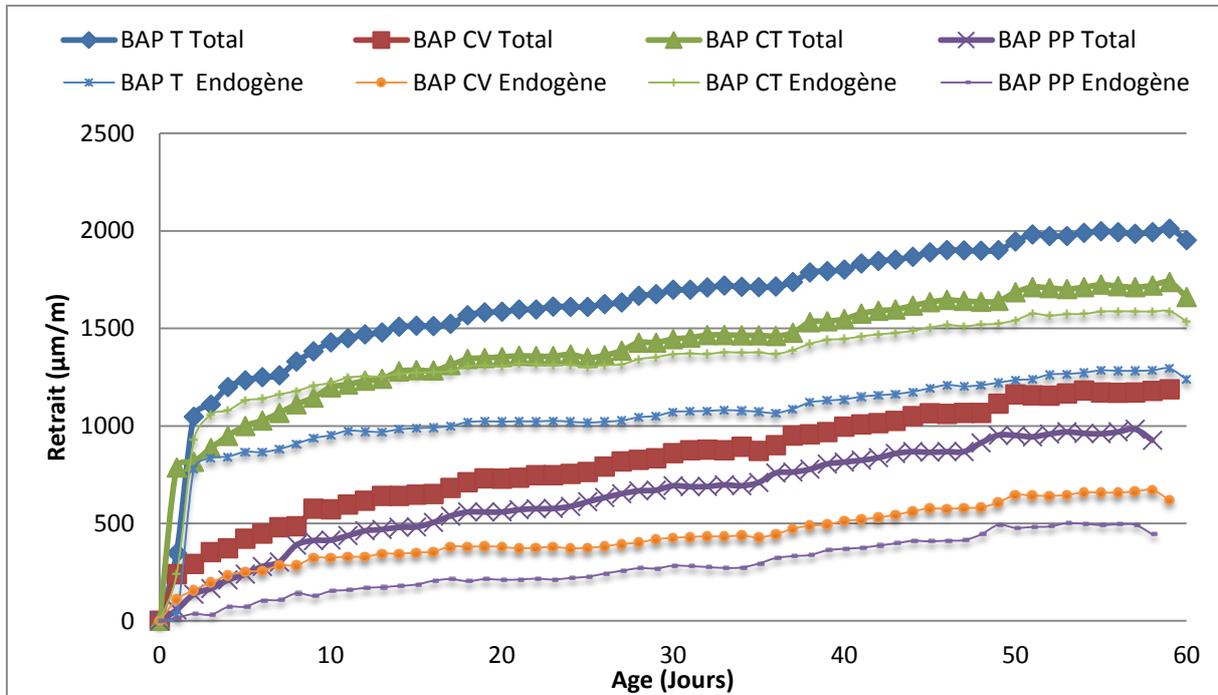


Figure V.18 : évolution du retrait totale et endogène des mélanges bétons autoplaçants.

#### V.4.1.3. Retrait de séchage

Un troisième retrait peut être calculé par différence en estimant qu'il y ait autonomie des phénomènes : le retrait de dessiccation, à partir des retraits (total et endogène) mesurés sur les spécimens.

Ce retrait peut être examiné comme dû seulement à la vaporisation de l'eau contenue dans la pâte de ciment hydraté et qui se développe à partir des faces exposées à l'environnement.

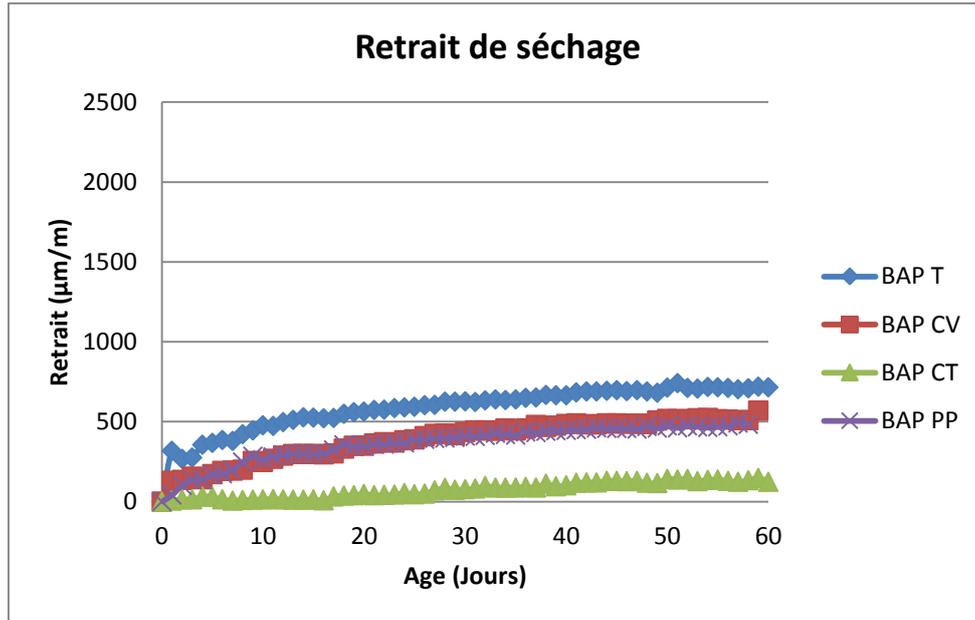


Figure V.19 : Evolution de retrait de séchage des différents bétons

Le retrait de séchage est ou de dessiccation est du lorsqu'il y a déséquilibre hydrique entre l'intérieur du béton durci dont l'hygrométrie de départ est de l'ordre de 75% à 100%, selon le rapport E/C et celle du milieu ambiant (il y a alors une perte de masse). La cinétique du retrait de dessiccation est liée à celle du départ de l'eau et dépend des conditions d'ambiance.

A partir de la figure V.19, on constate que l'ajout des fibres engendre une diminution du retrait de séchage et cette diminution est plus prononcée pour le mélange BAPPP.

#### V.4.1.4. Perte en poids

La figure V.20 montre l'évolution de la perte en poids en fonction du temps.

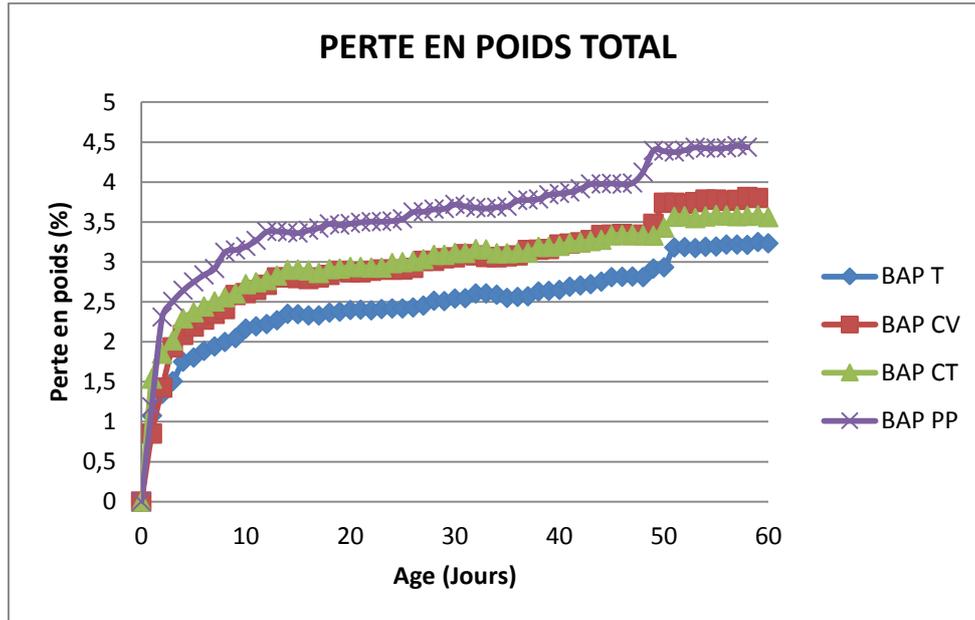


Figure V.20 : Evolution de la perte en poids de différents types de bétons autoplaçants.

Phase I : 3 jours d'âge on constate que les BAP avec des fibres présentent qu'en termes d'amplitude et de cinétique un rapport similaire pour tous les types de bétons.

Phase II : 5~60 jours d'âge on remarque que les BAPF ont subis une perte en poids plus élevée que le témoin.

Les différents résultats, obtenus pour des échantillons de différentes forme et compositions et ainsi de deux modes de conservation indiquent clairement qu'en terme d'amplitude et de cinétique, qu'en premier temps, la cinétique de la variation de la perte en poids croit rapidement dans  $5 \pm 1$  jours et après cette tolérance en observant une diminution de la cinétique.

#### V.4.1.5.Relation entre perte en poids et retrait

Les dernières recherches s'intéressent sur la relation entre la perte en poids et le retrait. Pour atteindre des buts tracés c'est-à-dire les retraits à partir de la perte en poids. Voir ci-contre les figures V.21.

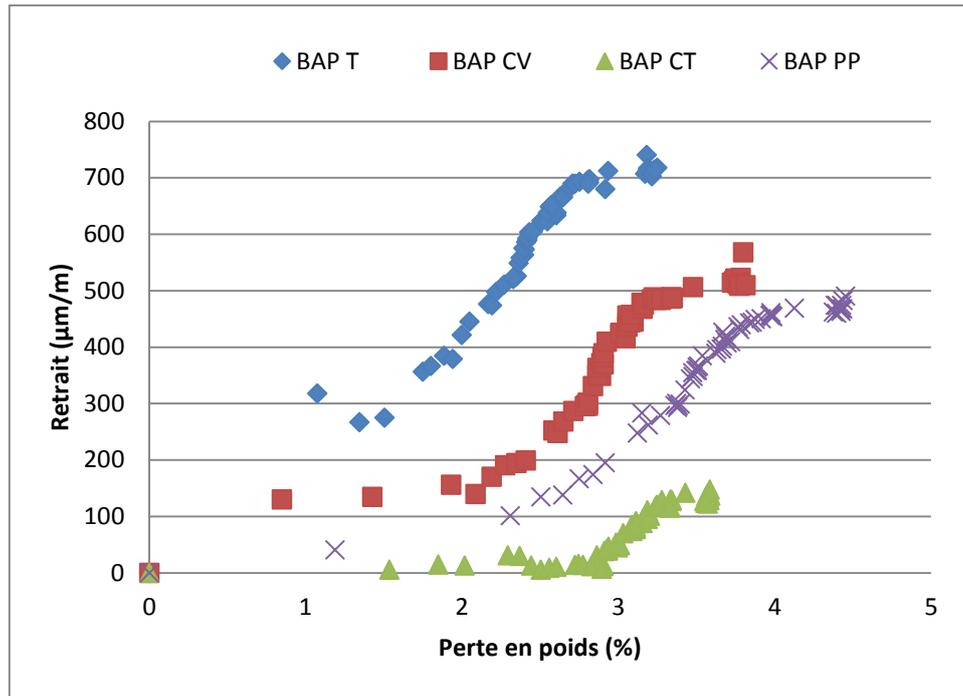


Figure V.21 : la relation entre retrait et perte en poids pour différents types de béton.

On constate qu'il y a un écart important entre les mélanges. Ce phénomène peut s'expliquer soit par le fait que la contraction de la matrice cimentaire devient infinie par épuisement d'eau évaporable, soit par le passage d'un comportement linéaire à un comportement non linéaire sans contrainte hydrique.

## V.2.Comportement thermo-mécanique

### V.2.1.La résistance à la compression résiduelle

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées, cette résistance mécanique a été calculée en conservant une échéance indispensable réglementaire à 28 jours par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cubiques 10x10x10 cm .

Les différents résultats sont présentés dans le tableau (V.9)

Tableau V.9 : comportement des BAPF aux différents cycles

	20°C	110°C	220°C	300°C	600°C
<b>BAPT</b>	31,62	26,97	14,75	29,35	0
<b>BAPCV</b>	38,91	28,65	33,77	37,84	0
<b>BAPCT</b>	37,35	30	31,97	32,29	0
<b>BAPPP</b>	26,23	22,21	25,52	27,11	0

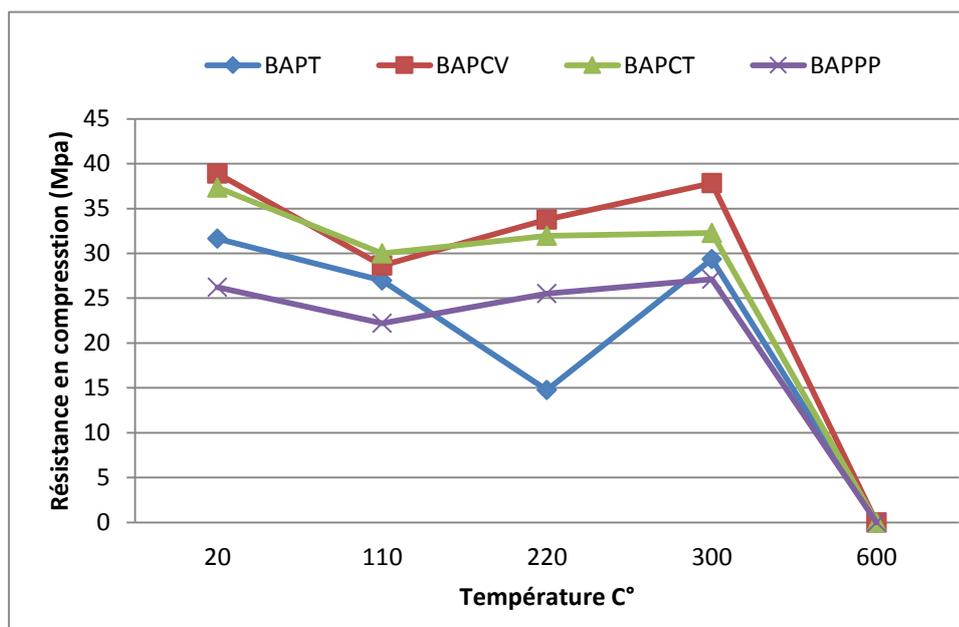
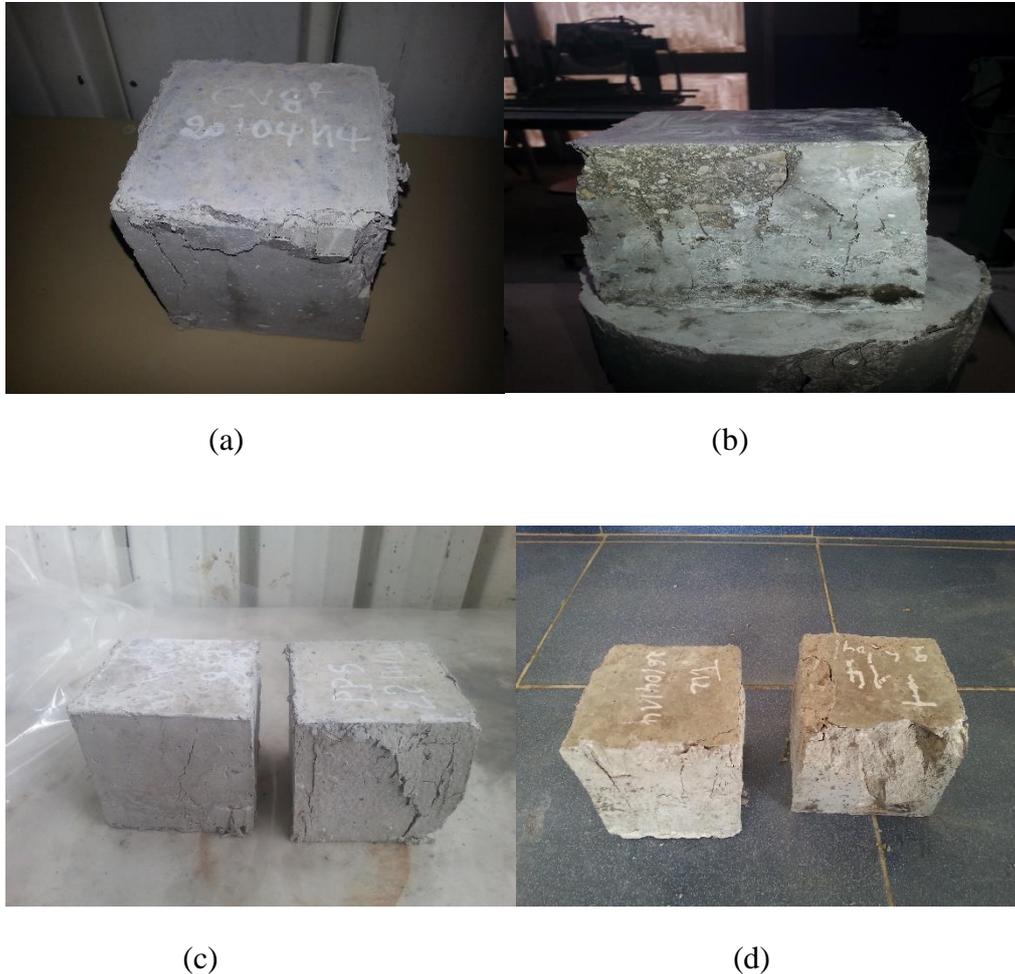


Figure V.22 : évolution de la résistance résiduelle de compression en fonction de la température.

La figure V.22 montre la variation de la résistance résiduelle en compression des différentes formulations étudiées en fonction de la température. On observe une diminution de la résistance de tous les BAP.

La diminution de résistance de tous types de BAPF dans l'intervalle 20 et 110°C est de la même façon avec un pourcentage variant de 14.75% pour BAPT, 26.36% pour BAPCV, et 19.67% BAPCT, et 15.32% BAPPP. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau.



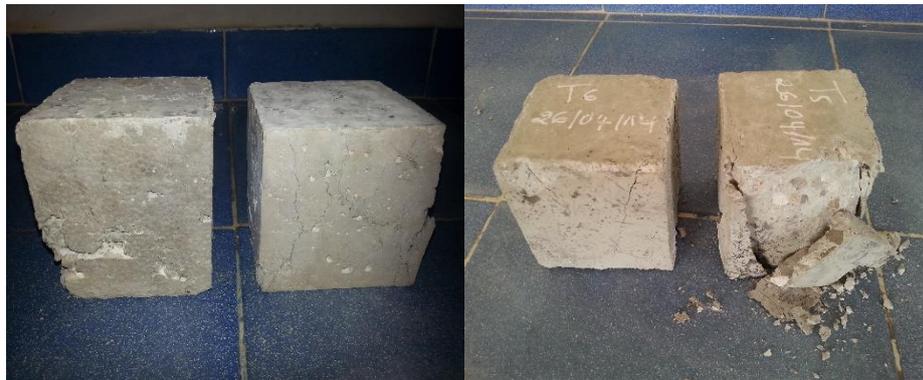
*Figure V.23: éprouvettes cubiques (10×10×10 cm) après cycle 110 °C*

Entre 110 et 220°C ,On observe une augmentation importante de la résistance en compression relative. Cette augmentation de résistance résiduelle représente un gain de (13.21, 14.4 et 2.7) % pour les BAPCV,BAPCT, BAPPP respectivement, par contre le BAPT a continué de baisser de 53.35%,mais cette augmentation de résistance des BAPF paraît grande par rapport au BAPT à cause de départ d'eau – séchage (eau libre) et de fusion de fibre de polypropylène sous une température de 110 -220 °C pour le BAPPP.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.24 : éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 220 °C

Entre 220C° et 300C°, nous observons une augmentation des valeurs de la résistance des BAPF. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Qui attribuent à une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau liée dans les pores et début de déshydratation du CSH. Pour cette raison qu'on a remarqué l'augmentation de résistance avec un pourcentage de 7.17- 2.75- 13.54% (BAPT, BAPCV, BAPCT) respectivement.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.25: éprouvettes cubique ( $10 \times 10 \times 10$  cm) après cycle  $300^\circ\text{C}$

Les observations du comportement des mélanges à la température  $600^\circ\text{C}$  menées que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. L'éclatement est la résultante des processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et concurrents.

De ce fait, le comportement à l'éclatement présente deux caractères sont, un éclatement hydraulique causé par des pressions internes venant des fluides (vapeur et eau liquide). Le pic de pression intégrerait la pression de vapeur plus la pression induite par la dilatation de la phase liquide saturant une zone (la dilatation propre de l'eau au-dessus de  $160^\circ\text{C}$  est assez importante) et des éclatements dus aux dilatations thermiques empêchées. Celles-ci génèrent des contraintes thermiques très élevées (contraintes de compression parallèles à la surface chauffée), ces contraintes de compression sont relâchées par une rupture fragile du béton, la pression dans les pores ne jouant qu'un rôle secondaire initiateur de l'instabilité. La fissuration empêcherait une mise en pression critique dans le matériau.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figure V.26: éprouvettes cubique (10×10×10 cm) après cycle 600 °C

#### V.4.2.2. Perte en poids résiduelle résiduelle

Vu l'importance de la partie hydrique dans les phénomènes de transport de chaleur et de masse, nous avons également étudié l'évolution de la perte de masse au cours des essais.

La perte de masse a été obtenue en mesurant la masse de l'éprouvette avant et après le cycle de chauffage pour les différentes éprouvettes, le bilan de masse nous a permis ensuite d'avoir l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.

Tableau V.9 : l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.

	BAPT	BAPCV	BAPCT	BAPPP
110 C°	1,84	2,34	2,26	2,13
220 C°	4,73	5,66	5,08	5,11
300 C°	6,57	6,8	6,65	7,56
600 C°	0	0	0	0

On observe pour un même cycle de température, que la même quantité d'eau est perdue dans les trois BAPF et qu'il n'y a pas une grande différence à la quantité d'eau perdu.

On remarque une perte de masse plus grande dans le deuxième cycle de BAPCV par rapport aux autres mélanges.

Les mêmes résultats qu'on a trouvé pour le troisième cycle mais le BAPPP a eu la plus grande valeur de perte en poids.

On constate que la perte en poids du BAPT est toujours plus faible par rapport au BAPF, cela pourrait s'expliquer par la capacité d'absorption des fibres et la quantité d'ajustement d'eau au moment de coulage.

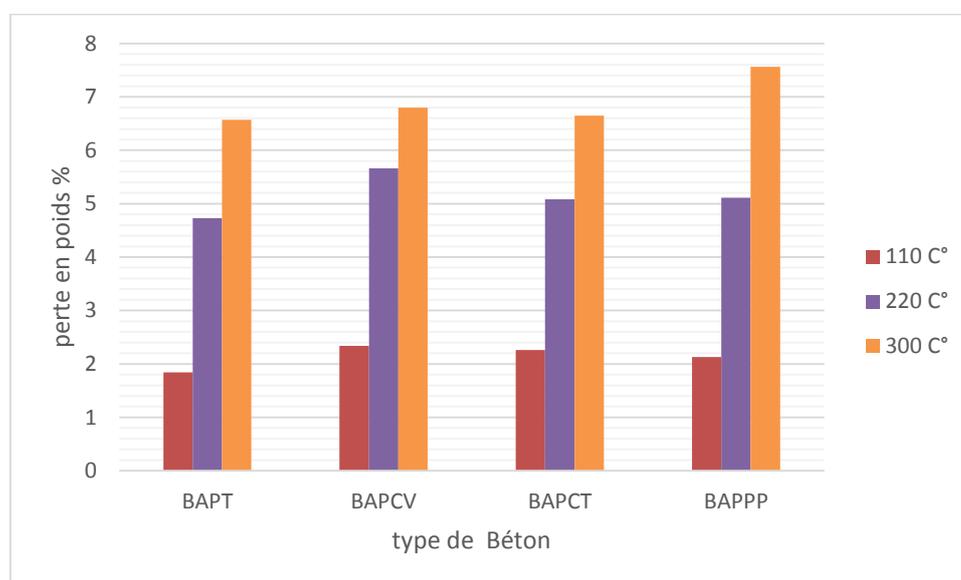


Figure V.27 : évolution de la perte en poids des BAPF en fonction de la température.

#### V.4.3. Porosité capillaire

La porosité accessible à l'eau est une caractéristique microstructurale qui influe sur les propriétés de transfert et sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

Les résultats des porosités accessibles à l'eau des différents BAPF à l'état durci sont donnés sous forme graphique dans la Figure V.28.

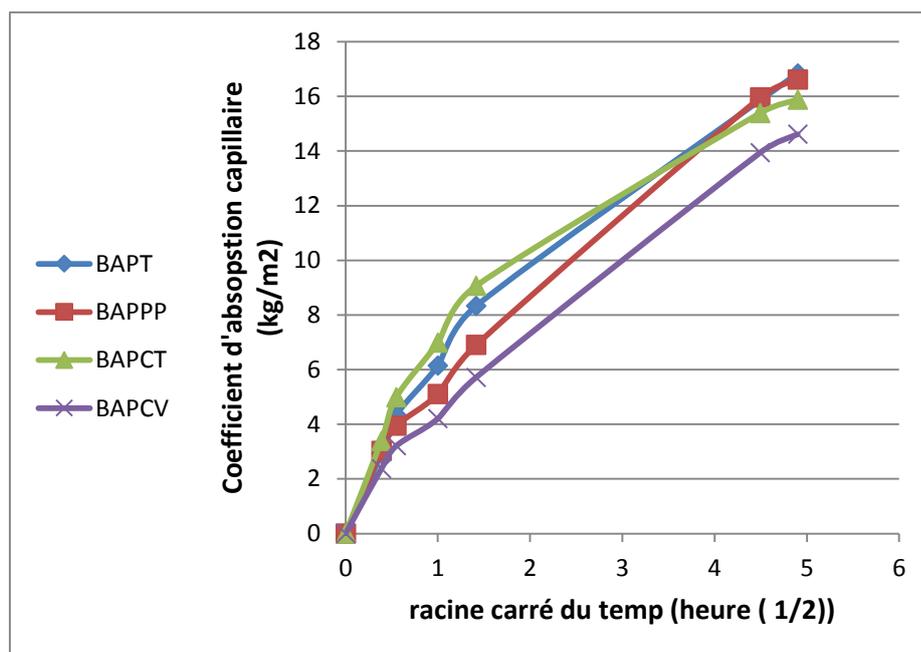


Figure V.28: Effet des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité.

L'influence des fibres sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur la figure V.28. Les valeurs de cette figure montre une augmentation de l'absorption avec le temps, est ce pour tous les mélanges. On remarque que le BAPCV est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit, par rapport aux autres mélanges.

## V.5.Durabilité des BAPF(Attaque sulfatique)

### V.5.1.Observation visuelle de dégradation



Figure V.29: les fissures multidirectionnelles après cinq cycles pour les quatre mélanges

En référence de la figure V.29, nous constatons des dégradations apparues après 5 cycles séchage - mouillage dans la solution de sulfate des différents mélanges.

On remarque qu'il y a apparition des fissures multidirectionnelle au niveau des BAPT et BAPCT, mais dans les BAPCV on constate qu'il y a des dégradations au niveau de la couche supérieure.

### V.5.2.Caractéristiques mécaniques

Pour évaluer les performances mécaniques des bétons soumis aux attaques sulfatiques on a effectué des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm pour mesurer la résistance à la compression et des prismes 7x7x28 cm pour mesurer la résistance à la traction par flexion.

#### V.5.2.1.Résistance à la compression

Pour bien définir l'effet de cycle séchage /mouillage (dans le sulfate) on a effectué des éprouvettes cubiques (10x10x10)cm . Après le cinquième cycle on a fait l'écrasement de deux échantillons pour chaque mélange. La figure V.30 montre l'évolution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles de séchage-mouillage et le témoin (dans l'eau).

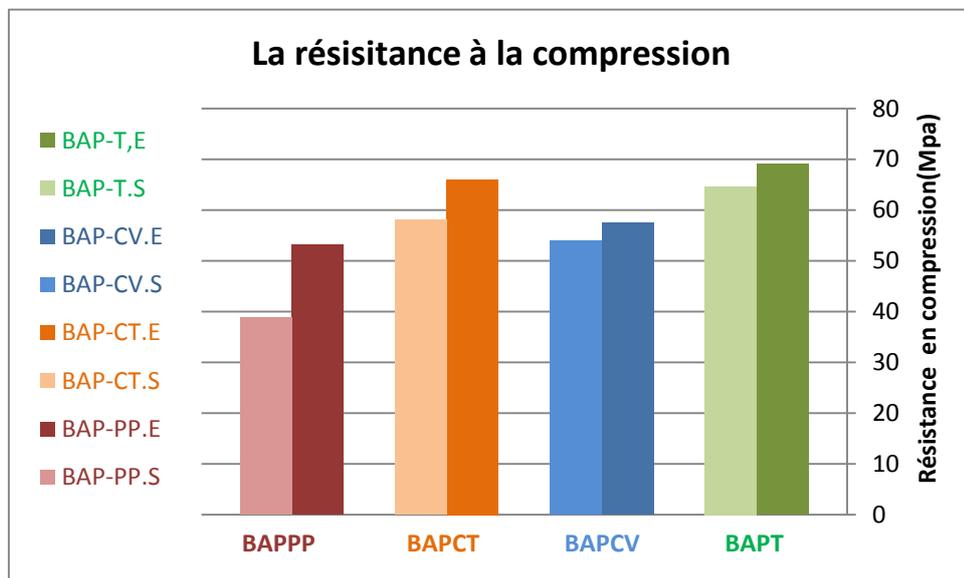


Figure V.30 : l'évolution de la résistance à la compression de différents types de béton après 5 cycles de séchage-mouillage et le témoin (dans l'eau).

D'après la figure V.30, on ne constate que le BAPT qu'après le cinquième cycle de séchage-mouillage, qu'il y a une diminution de la résistance à la compression de 7% par rapport au témoin (dans l'eau). Cette diminution est aussi différente d'un mélange à un autre.

### V.5.2.2. Résistance à la traction par flexion

Pour évaluer la résistance à la traction par flexion on a effectué des éprouvettes prismatique (7x7x28) cm. La figure V.31 montre la variation de la résistance à la traction par flexion de différents types de bétons après cinq cycles de séchage-mouillage et le témoin vierge.

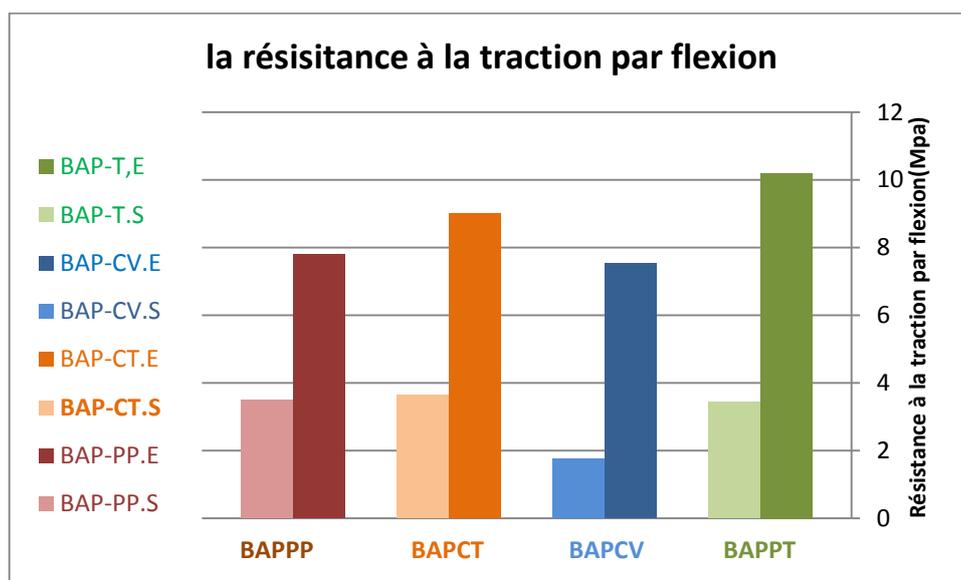


Figure V. 31 : l'évolution de la résistance à la traction par flexion de différents types de bétons après 5 cycles et le témoin (dans l'eau).

D'après la figure V.31, on constate qu'il y a une diminution remarquable de la résistance des échantillons soumis à l'attaque sulfatique combinée avec des cycles séchage-mouillage que les éprouvettes conservées dans l'eau avec un pourcentage de 66%, 59% 76% pour les BAPT, BAPCT, BAPCV respectivement.

Pour cela on conclut que la résistance à la traction est plus sensible que la résistance à la compression à l'attaque agressive.

### V.5.3. Variation dimensionnelle et pondérale

L'importance de l'évolution de l'écoulement d'eau dans les bétons pendant leur cycle séchage- mouillage dans les sulfates, nous a poussé à approfondir nos recherches, quant à la variation de la perte en poids et au retrait.

Des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm ont été effectuées munies de plots pour mesurer l'allongement et la perte en poids de ce dernier. On présentera dans la figure V-32 la variation dimensionnelle après chaque cycle de séchage- mouillage pour les quatre types de mélanges.

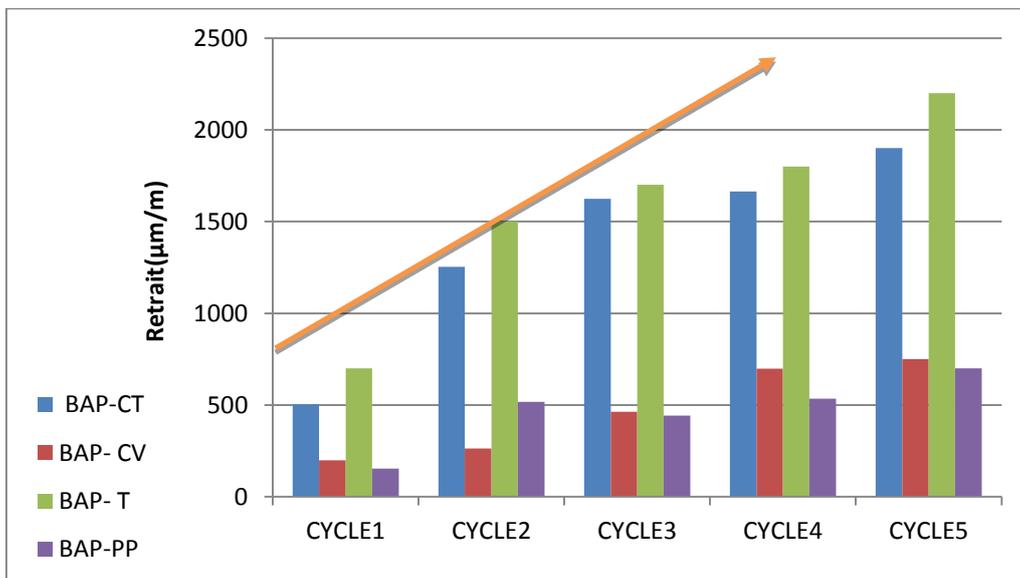
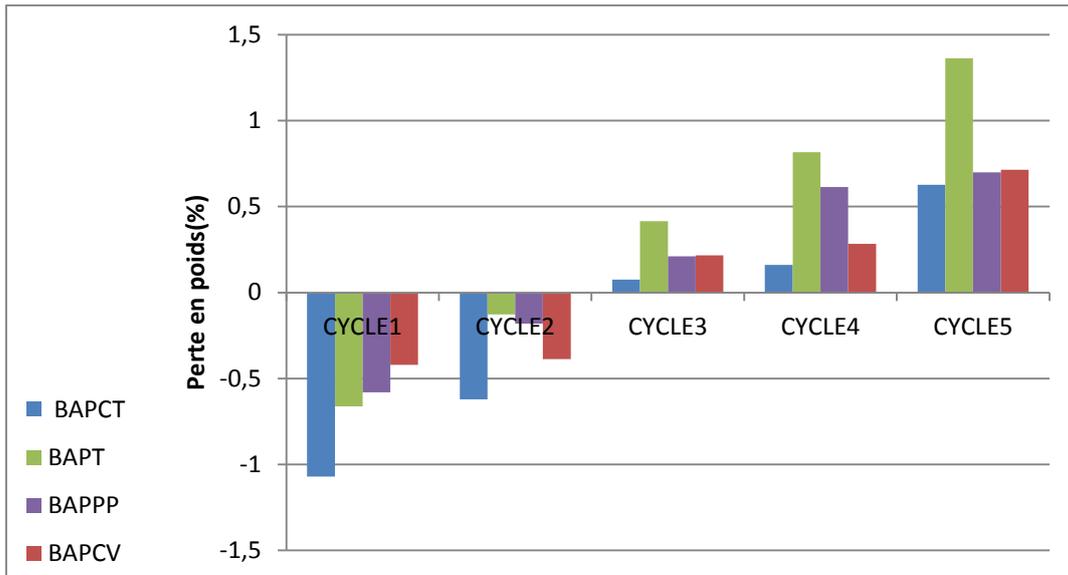


Figure V.32 : Evolution de la variation dimensionnelle suivant les cinq cycles de différents types de bétons.

A partir de cette figure on constate que la variation dimensionnelle augmente après chaque cycle. La remarque qui mérite l'attention que les BAPT subis un gonflement très élevé par rapport aux autres. Ce qui explique qu'il y a des fissures internes et externes qui facilitent le phénomène de diffusion de l'eau de sulfate dans les bétons. Mais les fibres de polypropylène et chanvre ont présenté des valeurs plus basses que le témoin et le chènevotte. Ceci peut s'expliquer que les fibres jouent un rôle d'un obstacle contre le déplacement de l'eau dans le béton.

La figure V.33 représente l'évolution de la perte en poids après cinq cycles séchage - mouillage des différents types du béton.



*FigureV.33 : Evolution de la perte en poids après cinq cycles séchage - mouillage des différents types de bétons.*

D'après la figure V.33 On constate qu'il y a une perte de masse durant les deux premiers cycles surtout BAPCT et BAPT mais dans le troisième cycle on constate qu'il y a un gonflement avec des valeurs différentes d'un mélange à l'autre. A titre exemple le BAPT présente un gain de poids considérable que les autres (BAPF).

### V.6.Conclusion

Dans cette étude les résultats rhéologiques obtenus sur les BAPF, ont révélés que :

- ✓ L'introduction des fibres végétales dans le béton, conduit à une augmentation de la demande en eau, le rapport E/C augmente en augmentant le dosage des fibres. Cependant, la compacité des BAPF diminue systématiquement vue les vides créés par ces fibres.
- ✓ L'évolution de l'ouvrabilité des BAP fibrés diminue, particulièrement aux milieux confinés.
- ✓ Les essais de la stabilité au tamis montrent que tous les mélanges sont stables.

D'autre part, les résultats des propriétés physiques et mécaniques obtenus sur les BAPF, ont montrés que :

- ✓ Les BAP fibrés donnent des résistances à la compression plus faible que le BAP non fibré.

- ✓ Les fibres végétales affectent la porosité et la perméabilité des BAP, en ajoutant les fibres et le BAP devient moins compact.
- ✓ Les résultats montrent que les BAPF se comportent mieux que BAPT sous l'élévation de la température.
- ✓ Les fibres limitent le retrait précisément pour le BAPCV et BAPPP.

Pour la durabilité (attaque sulfatique), le cycle de séchage–mouillage est très efficace pour accélérer le vieillissement des échantillons en béton, les performances mécaniques (résistances résiduelles à la compression et à la traction) des différents mélanges sont diminuées notamment la résistance à la traction par flexion, mais cette diminution varie d'un béton à l'autre, à titre d'exemple les BAP avec le polypropylène et le chanvre donnent des résultats plus bas, mais ils sont restés dans les fourchettes acceptables. Pour les variations dimensionnelles, les bétons autoplaçants sans fibre présentent des dégradations et des fissures remarquables que les bétons fibrés.

## CONCLUSION GENERALE

Notre travail consiste à étudier les propriétés et la durabilité des bétons autoplaçants de fibres, de chanvre, chènevotte et polypropylène. Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

L'étude bibliographique est basée sur les différents types de fibres et leurs utilisations, nous remarquons qu'il y'a une orientation accrue vers l'utilisation des fibres végétales ou de polymère pour remplacer les fibres d'amiante, métalliques.

Au moment de formulation et essais préliminaires, on a conclu :

Une quinzaine de compositions préliminaires de bétons, seuls quatre d'entre elles pouvaient être considérées comme des BAP. Nous avons formulé notre matrice de BAP, afin d'obtenir une ouvrabilité rentrant dans les fourchettes préconisées par L'AFGC. Cela est déterminée par les essais de caractérisation à l'état frais (Etalement, J-ring, boîte en L...), afin d'optimiser le rapport E/C et le dosage en superplastifiant pour obtenir une meilleure ouvrabilité. Ensuite, nous avons passé à la composition des BAP de fibres.

Et ce qui concerne l'influence des fibres sur les propriétés des BAP, les résultats ont conduit à :

Les performances mécaniques des BAPF diminuent légèrement par rapport au BAP non fibrés supposant des ajustements de l'eau et superplastifiant, mais elle reste toujours dans les fourchettes d'un béton de structures.

Les fibres végétales réduisent le coefficient d'absorptivité du mélange par rapport au BAP non fibrés avec des valeurs proches.

Pour les variations dimensionnelles, les fibres végétales limitent ce phénomène sous différents mode de conservation.

Les BA Pfibrés (chanvre, chènevotte)se comportent bien que les BAP de polypropylène et les BAP non fibrés sous une élévation de température.

Pour la durabilité (attaque sulfatique), les performances mécaniques (résistances résiduelles à la compression et à la traction) des différents mélanges sont diminuées notamment la résistance à la traction par flexion, mais cette diminution varie d'un béton à l'autre, à titre d'exemple les BAP avec le polypropylène et le chanvre donnent des résultats plus bas, mais ils sont restés dans les fourchettes acceptables. Pour les variations dimensionnelles, les bétons autoplaçants sans fibre présentent des

dégradations et des fissures remarquables que les bétons fibrés.

Concernant les variations dimensionnelles, les fibres limitent bien le retrait et la perte en poids. Les bétons autoplaçants sans fibre présentent des dégradations et des fissures remarquables précisément dans les éprouvettes prismatiques que les bétons fibrés.

Donc on résume que les bétons autoplaçants avec des fibres végétales et synthétiques présentent des résultats acceptables et efficaces dans certaines propriétés, comme le retrait, le comportement sous élévation de la température et dans des milieux agressifs.

D'après les résultats obtenus par cette recherche, et en vue d'une future utilisation rationnelle de ces matériaux composites, nous recommandons de compléter cette recherche par les axes suivants :

- Il est recommandé d'utiliser les fibres végétales avec un traitement chimique de NaOH.
- Il est conseillé de faire l'essai de conductivité thermique pour mieux connaître l'effet d'ajout des fibres sur le comportement des BAP.
- Pour avoir des justifications plus profondes, il est préférable de faire des analyses à l'aide de (MEB, DRX).

**Références bibliographiques :**

- [01] FEBELCEM – Fédération de l’Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants, Bruxelles, août 2005.
- [02] BILLBERG P., “Influence of filler characteristics on SCC rheology and earlyhydration”, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.
- [03] HANAA FARES «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçant exposés à une température élevée» Thèse de doctorat, Décembre 2009, Université de Cergy-Pontoise.
- [04] BARON J. et OLLIVIER J.P., « Les Bétons –Bases et données pour leur formulation »,Edition eyrolles,1996.
- [05] SANDRINE BETHMONT «mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP): Etude expérimentale des interactions granulaires thèse de doctorat.Ecole Nationale des ponts et chaussées,15 Décembre 2005.
- [06] MOHAMMED RISSEL KHELIFA, «Effet de l’attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçant», Thèse Doctorat, l’université de Constantine, l’université d’Orléans, 2009.
- [07] GOLASZEWZKI et SWABOWSKI, «influence of super plasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars», Cement and Concrete Research, 2004, vol 34, pp 235-248
- [08] AFGC. Recommandations de l’association française de Génie Civil pour l’emploi des Bétons autoplaçants projet national, Juin 2000.
- [09] SEDRAN THIERRY., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [10] AFGC. Recommandations de l’association française de Génie Civil pour l’emploi des Bétons autoplaçants projet national, Janvier 2008.
- [11] SEDRAN THIERRY., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [12] The European Guidelines for testing Self Compacting Concrete, Specification.
- [13] TURCRY PHILIPPE, «Retrait et fissuration des bétons autoplaçant-influence de la formulation» thèse de doctorat de l’Ecole centrale de Nantes, 2004.

- [14] Ayyar. T.S.R and Mirihagalla P.K. 1976, 'Elephant grass fibres as reinforcing fibre', Magazine of concrete research, Vol, 28, N°96, 162-167, September.
- [15] Romildo D. Toledo Filho a, Khosrow Ghavami ., George L. England ,Karen Scrivener, « Development of vegetable fibre mortar composites of improved durability » . Cement & Concrete Composites 25 (2003) 185–19
- [16] O. Bahloul utilisation des fibres végétales dans le renforcement de mortiers de ciment (cas de l'alfa) SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [17] S.K. Canovas, “New economical solutions for improvement of durability of portland cement mortars reinforced with sisal fibres” , Materials and Structures, 1992, pp. 417-422
- [18] R.Hamzaoui, S.Guessasma, B.Mecheri, A.Eshtiaghi, A.Bennabi (2013) “Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes” Materials and Design 56 (2014) : p. 60–68.
- [19] E.Awwad, M.Mabsout, B.Hamad, M.Talal Farran, H. Khatib “Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers “Construction and Building Materials 35 (2012) : p.710–717.
- [20] Zhijian Li, Xungai Wang, Lijing Wang « Properties of hemp fibre reinforced concrete composites » Composites: Part A 37 (2006) :p. 497–505
- [21] O.Bahloul,A.Bourzam,A.Bahloul « Utilisation Des Fibres Végétales dans le renforcement de Mortiers de ciment (Cas De L'alfa) ». SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- [22] A. Kriker , G. Debicki , A. Bali , M.M. Khenfera, M. Chabannet “Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate”. Cement & Concrete Composites 27 (2005) : p.554-564.
- [23] A.S. El-Dieb, M.M. Reda Taha” Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC)”. Construction and Building Materials 27 (2012) 585–596
- [24]H.Mazaheripour,S.Ghanbarpour,S.H.Mirmoradi,I.Hosseinpour “The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. Construction and Building Materials 25 (2011) 351–358
- [25] M.A.S.Mohamed,E. Ghorbel,. Wardah “Valorization of micro-cellulose fibers in self-compacting concrete. Construction and Building Materials 24 (2010) 2473–2480

- [26] V. Corinaldesi, G. Moriconi "Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions". *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 596–601.
- [27] Yining Ding, Cecília Azevedo, J.B. Aguiar, Said Jalali "Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete after exposure to high temperature". *Construction and Building Materials* 26 (2012) 21–31
- [28] Arabi N.S. Al Qadi, Sleiman M. Al-Zaidyeen " Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures". *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* (2014) 26, 33–39
- [29] K.K. Sideris, P. Manita "Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 41 (2013) 296–302
- [30] Jian-kang Chen, Min-qiang Jiang (2009) "Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion" *Construction and Building Materials* 23 (2009) 812–816
- [31] G. Indu Siva Ranjani, K. Ramamurthy (2012) " Behaviour of foam concrete under sulphate environments" *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 825–834
- [32] Kamile Tosun-Felekog̃lu (2012) "The effect of C3A content on sulfate durability of Portland limestone cement mortars" *Construction and Building Materials* 36 (2012) 437–447
- [33] Q. Zhou, F.P. Glasser .Thermal stability and decomposition mechanisms of ettringite at <120C. *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1333–1339
- [34] Adam Neville (2004) "The confused world of sulfate attack on concrete" *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1275–1296.
- [35] M. Collepardi (2003) " A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete" *Cement & Concrete Composites* 25 (2003) 401-407
- [36] Kamile Tosun, Burak Felekog̃lu, Bulent Baradan, I. Akin Altun (2009) "Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations" *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2534–2544

- [37]Nader Ghafoori, Hamidou Diawara, Shane Beasley (2008) "Resistance to external sodium sulfate attack for early-opening-to-traffic Portland cement concrete" *Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 444–454.
- [38]E. Rozière, A. Loukili , R. El Hachem, F. Grondin (2009) "Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks" *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 1188–1198.
- [39]E.F. Irassar, M. Gonzalez, V. Rahhal (2000) "Sulphate resistance of type V cements with limestone filler and natural Pozzolana" *Cement & Concrete Composites* 22 (2000) 361±368
- [40] N.N. Naik, A.C. Jupe, S.R. Stock , A.P. Wilkinson , P.L. Lee , K.E. Kurtis (2006) "Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate" *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 144 – 159
- [41] L. Orejarena, Mamadou Fall (2010) "The use of artificial neural networks to predict the effect of sulphate attack on the strength of cemented paste backfill" *Bull Eng Geol Environ* (2010) 69:659–670
- [42] M. Katsioti , N. Patsikas , P. Pipilikaki, N. Katsiotis, K. Mikedi , M. Chaniotakis « Delayed ettringite formation (DEF) in mortars of white cement. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 900–905.
- [43] M.T. Bassuoni a, M.L. Nehdi « Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading. *Cement and Concrete Research* 39 (2009) 206–226.
- [44] Kiachehr Behfarnia , Omid Farshadfar « The effects of pozzolanic binders and olypropylene fibers on durability of SCC to magnesium sulfate attack » *Construction and Building Materials* 38 (2013) 64–71
- [45] Bertil Persson « Sulphate resistance of self-compacting concrete » *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1933–1938
- [46] D. Sedan « Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite » Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2007.
- [47] A. Makani «Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons » Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse,2011.