

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Thèse de Doctorat

Présentée par :

Naamaoui née Haddadou Naima

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT** en :

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physique et Mécanique des Matériaux

TITRE

**Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant
fibré avec ajout de poudre de marbre**

Devant le jury composé de :

Mr	HAMIANE	Messaoud	Professeur	UMBB	Président
Mr	CHAID	Rabah	Professeur	UMBB	Directeur de thèse
Mr	KENAI	Saïd	Professeur	USDB	Examineur
Mr	MENADI	Belkacem	Professeur	USDB	Examineur
Mr	TALAH	Aïssa	MC/A	USTHB	Examineur

REMERCIEMENTS

De prime d'abord, je tiens à remercier le Dieu clément et bienveillant de m'avoir donné la force et le courage pour arriver à ce jour-là.

Ce travail a été accompli au sein de l'Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement de l'université de Boumerdès (UR-MPE), Laboratoires du Centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment, et du Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (CETIM) Boumerdès, Algérie.

Réaliser un travail de recherche et rédiger une thèse est le résultat des efforts non seulement d'une personne, mais de plusieurs. Certaines contribuent directement en fournissant des conseils, des commentaires constructifs ou un support technique. D'autres ne contribuent pas directement, mais apportent leur encouragement et leur soutien. Je tiens à remercier toutes ces personnes pour leur contribution à ce travail.

Je tiens à remercier :

En tout premier lieu, je voudrais manifester toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, monsieur CHAID Rabah, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses encouragements ainsi que la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordé durant mes quatre années de thèse.

Professeur HAMIENNE Messaoud, pour avoir présidé mon jury. Professeur KENAI Said, Professeur MENADI Belkacem et Docteur TALAH Aissa, d'avoir accepté de rapporter ce mémoire de thèse.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à monsieur Y.GHERNOUTI et sa femme B. Rabehi pour leur soutien et leurs encouragements.

Je tiens également à remercier tous les étudiants qui m'ont eu en tant qu'encadreur.

Mes remerciements vont également aux responsables et personnels du CNERIB, en particulier à monsieur M.BOUZOUALEGH, à monsieur M.IDIR et à mademoiselle N.ADJOU, pour l'aide précieuse et le soutien tout au long de la thèse. Merci aussi à monsieur M. SOUCI chef de division structures.

Il me serait impossible, enfin, de ne pas saluer ma famille et mes amis pour le soutien et les encouragements qu'ils n'ont cessé de me prodiguer, tout au long de cette entreprise.

Enfin, j'espère du fond du cœur que tout ce petit monde, trouve ici un mot de reconnaissance, et que chacun se reconnaisse en ce qui concerne. J'espère aussi que l'effort déployé dans la présente thèse réponde aux attentes des uns et des autres.

RESUME

ملخص

الى يومنا هذا، توجد اعمال تطبيقية قليلة التي تستغل بشكل كامل الخواص الريولوجية والميكانيكية للخرسانة الذاتية القولبة المسلحة بالألياف. الاستخدامات الاكثر شيوعا هي المتعلقة بمتانة الهياكل. يرجع هذا الى عدم وجود معرفة شاملة حول سلوك الكسر وغيرها من العوامل التي تحد من انتشاره حاليا.

ان هذا البحث العلمي يتمحور حول تصميم ودراسة تجريبية للخرسانة الذاتية القولبة المسلحة والغير المسلحة بالألياف والمكونة من مواد مصنعة محليا وتلبي بعض المتطلبات.

تتميز الجزائر بنمو تصاعدي، ما نتج عنه كميات كبيرة من المنتجات الثانوية مثل مسحوق الرخام، حيث ان استغلاله في الصناعة الاسمنتية يمكن ان يكون بديل للاهتمام البيئي والاقتصادي.

الهدف الاساسي الاول من هذا العمل، هو استغلال مسحوق الرخام كإضافة ثم كبديل جزئي للإسمنت مع اجراء دراسة مقارنة مع خرسانة ذاتية القولبة بإضافة الحجر الجيري. اظهرت النتائج التي تم الحصول عليها انه على الرغم من الفوائد الريولوجية والاقتصادية والبيئية الا ان هذا النوع من الخرسانة مع اضافة مسحوق الرخام لا يزال يظهر بعض النقائص، ولهذا الغرض اقترحنا استعمال اسمنت متعدد الاضافات (ثنائي، ثلاثي ورباعي) لتحسين بعض الخواص الميكانيكية على المدى الطويل.

لتحسين بعض الخواص الميكانيكية (المقاومة تحت الضغط وتحت الشد)، ادخلت الياف على الخرسانة الذاتية القولبة. الدراسة الاولى تعمل على فهم عامل تحديد حجم الالياف المعدنية بدلالة ابعادها. اما الدراسة الثانية فتشمل الخط الليني الذي يسمى عامة التهجين. عدة خلاط صممت بألياف معدنية، الياف البوليبروبيلان والياف الزجاج بأبعاد وحجوم مختلفة. النتائج المحصل عليها أثبتت ان استعمال اثنين او ثلاثة انواع من الالياف يمكن ان يحسن من الخصائص الجوهرية للخرسانة الذاتية القولبة.

كلمات مفتاحية خرسانة ذاتية القولبة، مسحوق الرخام، الياف معدنية، الياف اصطناعية، خواص ريولوجية، خواص ميكانيكية.

Résumé

À ce jour, peu d'applications pratiques ont été réalisées qui exploitent pleinement les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants fibrés. Les utilisations les plus courantes s'adressent plutôt à la durabilité des structures. Cela est en partie dû à un manque de connaissances exhaustives sur le comportement à la rupture des éléments en BAPF, ce qui est souligné par le peu de documents réglementaires spécifiques à ce sujet. Le coût des BAPF et la nécessité d'une mise en œuvre soignée sont d'autres facteurs qui limitent pour le moment sa diffusion.

Le sujet de recherche s'articule autour de la formulation et la caractérisation des bétons autoplaçants BAP avec et sans fibres confectionnés à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien) et qui répondent à un certain nombre d'exigences.

L'Algérie dispose d'immenses quantités de sous-produits industriels, tels que la poudre de marbre, dont sa valorisation dans les matériaux cimentaires pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, permettant d'élargir le champ d'emploi de la poudre de marbre et l'élimination de décharges encombrantes. Le but de ce travail en premier lieu est l'exploitation de la poudre de marbre dans les BAP comme ajout et sa substitution partielle au ciment à différents dosages et surface spécifique. À cet effet, une étude comparative a été menée sur un béton de référence avec addition calcaire.

Les résultats obtenus montrent que malgré les avantages techniques, économiques et écologiques rapportés par l'utilisation des ciments en substitution partielle avec poudre de marbre, ces derniers restent associés à des inconvénients. Il est donc nécessaire de savoir si des ciments à plusieurs composants (binaire, ternaire et quaternaire) ont des effets synergiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles.

Pour améliorer quelques propriétés mécaniques des bétons autoplaçant (résistance à traction, ductilité...), des fibres sont incorporées. Une première étude, contribue à la compréhension

des effets d'optimisation du dosage en fibres métalliques en fonction des longueurs. La deuxième action porte sur La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation. Des mélanges mixtes ou hybrides ont été formulés avec des fibres métalliques, de polypropylène et de verre de différentes longueurs et dosage.

Les résultats trouvés confirment que l'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes et des dosages appropriés peut potentiellement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant.

Mots clés : béton autoplaçants, poudre de marbre, fibres métalliques, fibres synthétiques, propriétés rhéologiques, propriétés mécaniques.

Abstract

Today, few practical applications were performed to fully exploit the rheological and mechanical properties of fiber reinforced self-compacting concrete (FRSCC). The most common uses are focused to the durability of structure's. This is partly due to the lack of information of the fracture behavior of elements FRSCC, which is noticed by the efficiency of specific requirement recommendation. The cost of FRSCC and the need for careful implementation are other factors that limit its diffusion. This research focuses on the formulation and characterization of self-compacting concrete (SCC) with and without fiber made from a range of materials available locally and satisfies number of requirements. Algeria has huge quantities of industrial by-products such as marble powder, its valuation in cementitious materials constitute an interesting ecological and economical alternative for broadening the field of employment of the marble powder and eliminating cumbersome landfills. The aim of this work in the first place is the exploitation of marble powder in the SCC as an addition and in second time as a partial replacement of cement at different percentages and specific surface areas. For this purpose, a comparative study was conducted on a reference concrete with limestone powder addition. The results show some disadvantages, despite the technical, economic and environmental benefits reported by the use of cement as partial substitution of marble powder. Therefore, it is necessary to find out if cement with a combination of additions (binary, ternary and quaternary) has synergistic effects so that the ingredients come to offset each other's weaknesses.

To improve some mechanical properties of self-compacting concrete (tensile strength, ductility ... etc.), fibers are incorporated. The first study, contributes to the understanding of the effects of dosage optimization steel fiber in function of the lengths. The second action involves the combination of fibers known as hybridization. Mixed or hybrid mixtures were made with steel fibers, polypropylene and glass with different lengths and dosage. The results confirm that the use of two or more types of fibers with different dimensions and appropriate dosages can potentially improve the intrinsic properties of SCC.

Keywords: self-compacting concrete, marble powder, steel fibers, synthetic fibers, rheological, mechanical properties.

Table des matières

REMERCIEMENTS.	I
RESUME.	II
LISTE DES FIGURES.	5
LISTE DES TABLEAUX.	9
INTRODUCTION GENERALE.	1
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.	
CHAPITRE I – LE BETON AUTOPLAÇANT.	5
I.1. CONCEPT DU BETON AUTOCOMPACTANT.	5
I.2. CAHIER DES CHARGES D’UN BETON AUTOPLAÇANT.	6
I.3. MATERIAUX DE BASE.	6
I.4. DOMAINES D’EMPLOI.	7
I.5. LES AVANTAGES DES BAP.	8
I.6. PARAMÈTRES AYANT UNE INFLUENCE SUR LE BAP.	9
I.6.1. Influence des granulats sur les propriétés des BAP.	9
I.6.2. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP.	10
I.6.3. Les fillers calcaires.	11
I.6.3.1. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques.	11
I.6.3.2. Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP.	12
I.6.4. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP.	12
I.6.4.1. Les superplastifiants.	12
I.6.4.2. Les agents de viscosité (ADV) ou agents Colloïdaux.	13
I.6.5. Influence du dosage en ciment.	15
I.6.6. Influence de la taille maximale des gravillons.	16
I.6.7. Influence du rapport E/C.	16
CONCLUSION.	17
CHAPITRE II – BETON AUTOPLAÇANT FIBRE (BAPF).	18
II.1. INTRODUCTION.	18
II.2. COMPOSITION DES BAPF.	18
II.3. FORMULATION DES BAPF.	18
II.4. COMPORTEMENT MECANIQUE DES BAPF.	19
II.5. INFLUENCE DES FIBRES SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES BAP.	20
II.5.1. Essai d’étalement.	20
II.5.2. Essai de V-funnel.	21
II.5.3. Essai J-RING.	22
II.5.4. Résistance à l’écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique).	22
II.6. ORIENTATION ET DISTRIBUTION DES FIBRES.	23
II.7. UTILISATION DES BAP FIBRES DANS LES STRUCTURES.	23
II.8. LES FIBRES.	24
II.8.1. Les différents types de fibres.	24
II.8.1.1. Les fibres métalliques.	24
II.8.1.2. Les fibres de polypropylènes.	24
II.8.2. Le rôle des fibres.	25
II.8.3. Influence des fibres sur les propriétés des BAPF à l’état frais.	26
II.8.4. Propriétés mécaniques des fibres métalliques.	26
CONCLUSION.	28
CHAPITRE III – FORMULATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS.	29
III.1. ASPECT EMPIRIQUE DE LA FORMULATION DES BAP.	29

III.1.1. Approche basée sur l'optimisation des mortiers.	30
III.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte.	30
III.1.3. Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire.	31
III.2. METHODES DE FORMULATION DES BAP.	32
III.2.1. Approche Japonaise.	32
III.2.2. Approche suédoise.	34
III.2.3. Approche de la JSCE.	35
III.2.4. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC.	35
III.2.5. Application de la méthode des plans d'expériences.	36
CONCLUSION.	37
CHAPITRE IV – PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS	38
IV.1. PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT FRAIS.	38
IV.1.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP.	38
IV.1.2. Essais de caractérisation des BETONS AUTOPLAÇANTS.	40
IV.1.2.1. Capacité de remplissage.	40
IV.1.2.2. Essai de la boîte.	41
IV.1.2.3. Essai de capacité de remplissage.	41
IV.1.2.4. Essai du tube en U.	42
IV.1.3. Déformabilité.	42
IV.1.3.1. Essai d'étalement (slump flow).	43
IV.1.3.2. Essai de la boîte en L.	43
IV.1.3.3. Essai de Viscosité.	44
IV.1.4. Stabilité ou ségrégation.	45
IV.1.5. Stabilité au tamis.	46
IV.2. PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT DURCI.	46
IV.2.1. Résistance mécanique.	47
IV.2.2. Module d'élasticité statique en compression.	48
IV.2.3. Retrait du béton.	49
IV.2.3.1. Retrait de dessiccation.	49
IV.2.3.2. Retrait endogène.	50
CONCLUSION.	52
CONCLUSION.	53
PARTIE EXPERIMENTALE	
CHAPITRE V. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	55
V.1. INTRODUCTION.	55
V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX.	55
V.2.1. Ciment.	55
V.2.2. Ajouts cimentaires.	57
V.2.2.1. Poudre de marbre.	57
V.2.2.2. Métakaolin.	60
V.2.2.3. Calcaire.	61
V.2.3. Superplastifiant.	62
V.2.4. Eau de gâchage.	63
V.2.5. Nature des sables utilisés.	63
V.2.5.1. Sable de dunes (Boussaâda).	63
V.2.5.2. Sable de rivière (Baghlia).	64
V.2.6. Gravier.	64
V.2.6.1. Gravier 3/8.	64
V.2.6.2. Gravier 8/15.	65
V.2.7. Fibres.	66
V.2.7.1. Fibres à crochets.	66
V.2.7.2. Fibres métalliques à crochets encollées.	66
V.2.7.3. Fibres métalliques ondulées.	67
V.2.7.4. Fibres de verre résistantes aux alcalis (fibres Cem-Fil [®]).	67
V.2.7.5. Fibres de polypropylène.	68
V.3. FORMULATION DES BAP.	68

_V.3.1. Méthode de formulation pratique des BAP.	68
CONCLUSION.	69
CHAPITRE VI – VALORISATION DE L’AJOUT Poudre de marbre dans les bétons autoplaçants	70
VI.1. INTRODUCTION.	70
VI.2. PRINCIPES DE FORMULATION.	71
VI.3. CARACTERISATION GENERALE DES BETONS A L’ETAT FRAIS ET DURCI.	73
VI.3.1. Masse volumique.	75
VI.3.2. Étalement.	75
VI.3.3. Résistance à la ségrégation statique.	76
VI.3.4. Résistance à la ségrégation dynamique.	77
VI.3.5. Évolutions de la résistance à la compression des éprouvettes de béton durci.	77
VI.3.6. Évolutions de la résistance à la traction par flexion des BAP.	78
VI.3.7. Évolutions de la vitesse de propagation de l’onde à travers les éprouvettes de béton durci.	79
VI.4. CONCEPTION STATISTIQUE ET MODELISATION PAR DES PLANS D’EXPERIENCES.	81
VI.4.1. Développement des modèles.	82
VI.4.1.1. Modèle 1 : La masse volumique.	86
VI.4.1.2. Modèle 2 : L’étalement.	87
VI.4.1.3. Modèle 3 : Stabilité au tamis.	88
VI.4.1.4. Modèle 4 : La boîte en L.	89
VI.4.1.5. Modèle 5 : La résistance à la compression.	90
VI.4.1.6. Modèle 6 : La résistance à la traction en flexion.	91
VI.4.1.7. Modèle 7 : La vitesse de propagation de l’onde.	92
CONCLUSION.	92
VI.5. VALORISATION DE LA Poudre de marbre et les fillers calcaire dans les bétons autoplaçants (L’EFFET DE LA SSB).	93
VI.5.1. Propriétés à l’état frais.	93
VI.5.2. Propriétés à l’état durci.	96
VI.6. VALORISATION DE L’AJOUT Poudre de marbre dans les bétons autoplaçants fibres.	98
VI.6.1. Introduction.	98
VI.6.2. Compositions étudiées.	99
VI.6.3. L’effet des fibres sur les propriétés rhéologiques.	101
VI.6.3.1. Influence des fibres sur l’étalement.	101
VI.6.3.2. Influence des fibres sur T500.	102
VI.6.3.3. Influence des fibres sur la stabilité au tamis.	102
VI.6.3.4. Influence des fibres sur la boîte en L.	103
VI.6.4. L’effet des fibres sur les propriétés mécaniques.	105
VI.6.4.1. Influence des fibres sur la résistance à la compression.	105
VI.6.4.2. Influence des fibres sur la résistance à la traction par flexion.	106
VI.6.4.3. Influence des fibres sur la vitesse de propagation de l’onde.	107
CONCLUSION.	107
CHAPITRE VII –VALORISATION DE L’AJOUT CIMENTAIRE Poudre de marbre dans les bétons autoplaçants	109
VII.1. INTRODUCTION.	109
VII.2. OPTIMISATION DU RAPPORT E/C ET LE DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT.	109
VII.3. ETUDE RHEOLOGIQUE DES PATES CIMENTAIRES.	111
VII.3.1. Étude rhéologique de la pâte cimentaire binaire (ciment + poudre de marbre).	111
VII.3.2. Étude rhéologique de la pâte cimentaire ternaire (ciment + poudre de marbre + fumée de silice).	112
VII.3.3. Étude rhéologique de la pâte cimentaire quaternaire (ciment + poudre de marbre + fumée de silice + metakaolin).	113
VII.3.4. Optimisation des constituants pour 1m ³ de béton.	114
VII.3.5. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques.	117
VII.3.5.1. Influence de la poudre de marbre sur l’étalement.	117
VII.3.5.2. Influence de la poudre de marbre sur la stabilité au tamis.	118
VII.3.5.3. Influence de la poudre de marbre sur la boîte en L.	118
VII.3.6. Influence de la poudre de marbre sur la masse volumique.	119

VII.3.7. Influence de la poudre de marbre sur air occlus.	119
VII.4. EFFET DE LA POUDRE DE MARBRE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES.	120
VII.4.1. Effet de la poudre de marbre sur la résistance à la compression.	120
VII.4.2. Effet de la poudre de marbre sur la résistance à la traction par flexion.	121
VII.5. CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS AVEC DES CIMENTS BINAIRE TERNAIRE ET QUATERNAIRE.	121
VII.5.1. Effet des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur les propriétés rhéologiques.	122
VII.5.2. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la masse volumique.	122
VII.5.3. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur l'étalement.	122
VII.5.4. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la stabilité au tamis.	123
VII.5.5. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur air occlus.	124
VII.5.6. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la boîte en L.	125
VII.6. EFFET DES CIMENTS BINAIRE, TERNAIRE ET QUATERNAIRE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES.	126
VII.6.1. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la résistance à la compression.	126
VII.6.2. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la résistance à la traction par flexion.	127
VII.7. RETRAIT.	128
VII.8. ABSORPTION D'EAU.	130
VII.8.1. Absorption d'eau capillaire.	130
VII.8.2. Absorption d'eau par immersion.	132
CONCLUSION.	133
VII.9. VALORISATION DU CIMENT AVEC AJOUT CIMENTAIRE POUDRE DE MARBRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES.	135
VII.9.1. Introduction.	135
VII.9.2. Caractérisation des performances d'un béton autoplaçant renforcé de fibres.	135
VII.9.3. Caractérisation des performances d'un béton autoplaçant renforcé de fibres a crochets.	136
VII.9.4. Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.	138
VII.9.4.1. Résultats des essais.	138
VII.9.5. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques des BAP.	139
VII.9.5.1. Résistance à la compression.	139
VII.9.5.2. Résistance à la Traction par fendage.	140
VII.9.5.3. Résistance à la Traction par flexion.	141
VII.9.6. Effet des fibres sur la vitesse de propagation de l'onde.	142
CONCLUSION.	143
VII.10. CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT BI-FIBRE.	144
VII.10.1. Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.	146
CONCLUSION.	151
VII.11. CARACTERISATION DES PERFORMANCES D'UN BETON AUTOPLAÇANT RENFORCE DE DIFFERENTS TYPES DE FIBRES.	151
VII.11.1. Compositions optimisées.	151
VII.11.2. Effet des fibres et des ajouts cimentaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP	153
VII.11.2.1. Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.	153
VII.11.2.2. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques des BAP.	154
CONCLUSION.	157
VII.12. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE.	158
CONCLUSION.	160
CONCLUSION GENERALE	162
PERSPECTIVES	167
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	168
COMMUNICATIONS ET PUBLICATIONS	178

Liste des figures

Fig. I-1 – Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [6].	5
Fig. I-2 – Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [7].	8
Fig. I-3 – Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant [24].	13
Fig. I-4 – Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP [22].	14
Fig. I-5 – Interaction entre l'eau et les polysaccharides.	15
Fig. I-6 – Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré [27].	16
Fig. II-1 – Effets des fibres sur l'étalement des BAP [47].	21
Fig. II-2 – L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [48].	21
Fig. II-3 – L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres [48].	22
Fig. II-4 – Différents types de fibres métalliques.	24
Fig. II-5 – Fibres de polypropylènes.	25
Fig. II-6 – Illustration de l'apport du renfort par des fibres [54].	25
Fig. II-7 – Différentes formes géométriques de fibres métalliques.	27
Fig. III-1 – Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.	33
Fig. III-2 – Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.	33
Fig. III-3 – Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D [70].	34
Fig. IV-1 – Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [71].	39
Fig. IV-2 – Rhéomètres développés pour les bétons.	40
Fig. IV-3 – Essai de la boîte [72].	41
Fig. IV-4 – Essai de capacité de remplissage [73].	42
Fig. IV-5 – Essai du tube en U.	42
Fig. IV-6 – Mesure de l'étalement des BAP.	43
Fig. IV-7 – Essai de la boîte en L.	44
Fig. IV-8 – Rhéologie du Béton [75].	45
Fig. IV-9 – Essai de l'entonnoir [76, 77].	46
Fig. IV-10 – Essai de stabilité au tamis.	46
Fig. IV-11 – Évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [82].	48
Fig. IV-12 – Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [92].	50
Fig. IV-13 – retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [95].	50
Fig. IV-14 – Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [93].	51
Fig. IV-15 – Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [96].	51
Fig. V-1 – Diffractogramme du ciment anhydre CEM II 42,5.	56
Fig. V-2 – Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5	56
Fig. V-3 – Diffractogramme de la poudre de marbre.	58
Fig. V-4 – Distribution granulométrique de la poudre de marbre	58
Fig. V-5 – Diffractogramme de la fumée de silice.	59
Fig. V-6 – Distribution granulométrique de la fumée de silice	59
Fig. V-7 – Métakaolin broyé.	60
Fig. V-9 – Distribution granulométrique du métakaolin	61
Fig. V-10 – Distribution granulométrique des fillers calcaire (ALCAL F50).	62
Fig. V-11 – Courbe récapitulative de l'analyse granulométrique du ciment et ses ajouts.	62
Fig. V-12 – Courbes granulométriques des granulats.	66
Fig. V-13 – Fibres métalliques à crochets	66

Fig. V-14 –Fibres métalliques à crochets encollés.	67
Fig. V-15 – Fibres métalliques ondulées.	67
Fig. V-16 – Fibres de verre.	68
Fig. V-17 – Fibres de polypropylène.	68
Fig. VI-1 – Essai d'étalement du béton témoin.	74
Fig. VI-2 – Essai de la boîte en L du béton témoin	74
Fig. VI-3 – Variation de la masse volumique des BAP en fonction de la finesse, % d'ajout et % du superplastifiant.	75
Fig. VI-4 – Évolution de l'étalement en (mm).	76
Fig. VI-5 – Variation de la ségrégation statique en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.	76
Fig. VI-6 – Variation du taux de remplissage H_2/H_1 .	77
Fig. VI-7 – Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.	78
Fig. VI-8 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.	80
Fig. VI-9 – Corrélation entre les résistances mécaniques.	81
Fig. VI-10 – Diagramme de Pareto relatif à la masse volumique à l'état frais.	83
Fig. VI-11 – Diagramme de Pareto relatif à l'étalement.	83
Fig. VI-12 – Diagramme de Pareto relatif à la stabilité au tamis.	84
Fig. VI-13 – Diagramme de Pareto relatif à la boîte en L	84
Fig. VI-14 – Diagramme de Pareto relatif à la résistance compression.	85
Fig. VI-15 – Diagramme de Pareto relatif à la traction par flexion.	85
Fig. VI-16 – Diagramme de Pareto relatif à la vitesse de propagation de l'onde.	86
Fig. VI-17 – Iso réponse de la masse volumique en fonction du % ajout et la SSB.	87
Fig. VI-18 – Iso réponse de la masse volumique en fonction du % superplastifiant et la SSB.	87
Fig. VI-19 – Surface de réponse de la masse volumique en fonction du % ajout et la SSB.	87
Fig. VI-20 – Surface de réponse de la masse volumique en fonction du % superplastifiant et la SSB	87
Fig. VI-21 – Iso réponse de l'étalement en fonction du % ajout et la SSB.	88
Fig. VI-22 – Iso réponse de l'étalement en fonction du % superplastifiant et la SSB.	88
Fig. VI-23 – Surface de réponse de l'étalement en fonction du % ajout et la SSB.	88
Fig. VI-24 – Surface de réponse de l'étalement en fonction du % superplastifiant et la SSB	88
Fig. VI-25 – Iso réponse de la stabilité au tamis en fonction du % ajout et la SSB.	89
Fig. VI-26 – Iso réponse de la stabilité au tamis en fonction du % superplastifiant et la SSB.	89
Fig. VI-27– Surface de réponse de la stabilité au tamis en fonction du % ajout et la SSB.	89
Fig. VI-28 – Surface de réponse de la stabilité au tamis en fonction du % superplastifiant et la SSB.	89
Fig. VI-29 – Iso réponse de la boîte en L en fonction du % ajout et la SSB.	90
Fig. VI-30 – Iso réponse de la boîte en L en fonction du % superplastifiant et la SSB.	90
Fig. VI-31 – Surface de réponse de la boîte en L en fonction du % ajout et la SSB.	90
Fig. VI-32 – Surface de réponse de la boîte en L en fonction du % superplastifiant et la SSB	90
Fig. VI-33 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.	91
Fig. VI-34 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB.	91
Fig. VI-35 – Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.	91
Fig. VI-36– Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB	91
Fig. VI-37 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.	91
Fig. VI-38 – Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB	91
Fig. VI-39 – Iso réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % ajout et la SSB	92
Fig. VI-40 – Iso réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % superplastifiant et la SSB.	92
Fig. VI-41 – Surface de réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % ajout et la SSB.	92
Fig. VI-42 – Surface de réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % superplastifiant et la SSB.	92

Fig. VI-43 – Évolution de la masse volumique en fonction de la SSB	94
Fig. VI-44 – Évolution de l'étalement en fonction de la SSB	94
Fig. VI-45 – Évolution de temps t500 en fonction de la SSB	94
Fig. VI-46 – Évolution de la stabilité en fonction de la SSB	94
Fig. VI-47 – Évolution de la boîte en L en fonction de la SSB	95
Fig. VI-48 – Variation de la Rc en fonction de la SSB	96
Fig. VI-49 – Variation de la Rtf en fonction de la SSB	96
Fig. VI-50 – Variation de Mv en fonction de la SSB	97
Fig. VI-51 – Variation de l'Abs en fonction de la SSB	97
Fig. VI-52 – Variation de l'étalement en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.	101
Fig. VI-53 – Variation du T500 en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.	102
Fig. VI-54 – Variation de la stabilité au tamis en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.	103
Fig. VI-55 – Variation de la boîte en L en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.	103
Fig. VI-56 – Essais rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés.	104
Fig. VI-57 – Essais mécaniques des BAPF et BAP.	105
Fig. VI-58 – Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de la durée de conservation.	105
Fig. VI-59 – Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de la durée de conservation.	106
Fig. VI-60 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique.	107
Fig. VII-1 – Cône pour mesurer l'étalement de la pâte du ciment.	110
Fig. VII-2 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Binaire.)	111
Fig. VII-3 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement avec différents pourcentages de poudre de marbre.	112
Fig. VII-4 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Ternaire).	113
Fig. VII-5 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement (Mélange Ternaire).	113
Fig. VII-6 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Quaternaire).	113
Fig. VII-7 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement (Mélange Quaternaire).	114
Fig. VII-8 – Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement.	117
Fig. VII-9 – Effet du taux de poudre de marbre sur la stabilité au tamis.	118
Fig. VII-10 – Effet du taux de poudre de marbre sur H_2/H_1 .	118
Fig. VII-11 – Effet du taux de poudre de marbre sur la masse volumique à l'état frais.	119
Fig. VII-12 – Effet du taux de poudre de marbre sur l'air occlus.	120
Fig. VII-13 – Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.	120
Fig. VII-14 – Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la traction par flexion à différents âges.	121
Fig. VII-15 – Effet du type de ciment sur la masse volumique.	122
Fig. VII-16 – Effet du type de ciment sur l'étalement.	123
Fig. VII-17 – Effet du type de ciment sur la stabilité des BAP.	124
Fig. VII-18 – Effet du type de ciment sur l'air occlus des BAP.	125
Fig. VII-19 – Effet du type de ciment sur H_2/H_1 des BAP.	125
Fig. VII-20 – Effet du type de ciment sur la résistance à la compression des BAP.	126
Fig. VII-21 – Effet du type de ciment sur la résistance à la traction par flexion des BAP.	128
Fig. VII-22 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP binaires	129
Fig. VII-23 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP ternaire.	129
Fig. VII-24 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP quaternaire.	129
Fig. VII-25 – Schéma du dispositif de l'essai d'absorption d'eau capillaire.	130
Fig. VII-26 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP binaires.	130

Fig. VII-27 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP ternaires.	131
Fig. VII-28 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP quaternaires.	131
Fig. VII-29 – Schéma du dispositif de l'essai d'absorption d'eau par immersion.	132
Fig. VII-30 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP binaires.	132
Fig. VII-31 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP ternaires.	132
Fig. VII-32 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP quaternaires.	133
Fig. VII-33 – Résistance à la compression des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.	139
Fig. VII-34 – Résistance à la traction par fendage des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.	140
Fig. VII-35 – Résistance à la traction par flexion des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.	141
Fig. VII-36 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.	143
Fig. VII-37 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la compression.	148
Fig. VII-38 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la traction par fendage.	148
Fig. VII-39 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion.	149
Fig. VII-40 – Évaluation des propriétés physico-mécaniques des BAP et BAPF.	150
Fig. VII-41 – Effet de différents types de fibres sur la résistance à la compression	155
Fig. VII-42 – Effet de différents types de fibres sur la résistance à la traction par flexion	156
Fig. VII-43 – Effet des différents types de fibres sur la vitesse de propagation de l'onde sonore	157

Liste des tableaux

Tableau II-1– Recommandation concernant l’espace normalisé des barres afin d’éviter le blocage dans les BAPF [35].	22
Tableau II-2 – Domaines d’application.	23
Tableau IV-1 – Les propriétés essentielles des BAP frais. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP [11].	38
Tableau V-1 – Composition chimique du ciment CEM II 42,5.	55
Tableau V-2 – Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5.	55
Tableau V-3 – Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5.	56
Tableau V-4 – Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42,5.	57
Tableau V-5 – Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.	57
Tableau V-6 – Composition chimique de la poudre de marbre.	57
Tableau V-7 – Composition minéralogique de la poudre de marbre.	57
Tableau V-8 – Caractéristiques physiques de la fumée de silice.	58
Tableau V-9 – Composition chimique de la fumée de silice.	59
Tableau V-10 – Caractéristiques physiques du métakaolin.	60
Tableau V-11 – Composition chimique du métakaolin.	60
Tableau V-12 – Composition minéralogique du métakaolin.	60
Tableau V-13 – Composition chimique du calcaire.	61
Tableau V-14 – Caractéristiques physiques des fillers calcaire à différentes SSB.	61
Tableau V-15 – Caractéristiques du MEDAFLOW 30.	63
Tableau V-16 – Caractéristiques de MEDAFLOW 145.	63
Tableau V-17 – Caractéristiques du sable de dunes.	63
Tableau V-18 – Analyse granulométrique du sable de dunes (Boussaâda).	63
Tableau V-19 – Caractéristiques du sable de rivière.	64
Tableau V-20 – Analyse granulométrique du sable de rivière (BAGHLIA).	64
Tableau V-21 – Caractéristiques physiques du gravier 3/8.	64
Tableau V-22 – Analyse granulométrique du gravier 3/8.	65
Tableau V-23 – Caractéristiques physiques du gravier 8/15.	65
Tableau V-24 – Analyse granulométrique du gravier 8/15.	65
Tableau V-25 – Caractéristiques physiques du gravier 8/15.	65
Tableau V-26 – Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets.	66
Tableau V-27 – Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets encollées.	67
Tableau V-28 – Caractéristiques techniques des fibres de polypropylène.	68
Tableau VI-1 – Différentes compositions, pour 1m ³ de béton.	73
Tableau VI-2 – Propriétés rhéologiques et mécaniques des différentes compositions.	74
Tableau VI-3 – Codage et valeurs absolues des paramètres étudiés.	82
Tableau VI-4 – Caractéristiques rhéologiques des BAP avec poudre de marbre et filler calcaire.	93
Tableau VI-5 – Différentes compositions de béton.	100
Tableau VI-6 – Résultats des propriétés rhéologiques et mécaniques des BAPF et BAP	104
Tableau VII-1 – Diamètres de la galette de la pâte de ciment avec ajouts mesurés au mini cône.	110
Tableau VII-2 – Optimisation des constituants pour 1 m ³ de béton.	116
Tableau VII-3 – Taux de substitution du ciment par les additions minérales.	116
Tableau VII-4 – Différentes compositions des BAP et BAPF d’un mètre cube de béton.	137
Tableau VII-5 – Caractérisation des BAP et BAPF à l’état frais.	138

Tableau VII-6 – Différentes compositions des BAP et BAPF.	145
Tableau VII-7 – Caractérisation des BAP et BAPF à l'état frais.	146
Tableau VII-8 – Caractérisation des BAP et BAPF à l'état durcis.	146
Tableau VII-9 – Différentes compositions des BAP et BAPF d'un mètre cube de béton.	152
Tableau VII-10 – Différentes compositions des BAP et BAPF d'un mètre cube de béton.	153

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances (BHP) ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par emploi de défloculant et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance et de durabilité que l'on connaît [1].

En prolongement de ces travaux scientifiques, l'amélioration constatée de l'ouvrabilité de ces nouveaux bétons a conduit les chercheurs à développer et à fiabiliser cette propriété.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplaçants : l'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Ce sont désormais, avec les bétons autoplaçants, les aptitudes à être aisément mis en œuvre sans vibration qui sont devenues prioritaires. Ces aptitudes vont avoir de grandes conséquences en termes de délai d'exécution, de réduction de matériels, de qualité de bétonnage, de faciliter la mise en œuvre, de respect du voisinage et de moindre pénibilité pour les ouvriers [2].

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans les coffrages les plus ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau final présente des propriétés homogènes, c'est-à-dire s'il n'a pas subi de ségrégation.

À la différence des BHP, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les BAP se démocratisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. La production reste certes minime de 1 à 4 % du volume total, mais les BAP ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel. En témoignent les gains de productivité et l'élimination des problèmes liés à la vibration, souvent évoqués à leurs propos. À cela s'ajoute aussi un contexte social favorable. Les métiers du génie civil ont du mal à recruter une nouvelle génération, indispensable au remplacement d'une main d'œuvre vieillissante. Les BAP figurent parmi les progrès techniques qui rendent plus attractifs ces métiers, parce qu'améliorant les conditions sur chantier. Plus globalement, les BAP ont une place à prendre dans le souci, voire l'obligation légale, de l'industrie de respecter l'environnement.

L'intérêt porté aux BAP pour la profession a donné naissance à des projets à travers le monde rassemblant des industries et des laboratoires de recherches, dont les objectifs communs est une meilleure maîtrise des bétons autoplaçants.

Comme pour tout nouveau matériau, il est de fait nécessaire d'adapter les techniques usuelles d'utilisation, de vérifier si le comportement mécanique des BAP, à l'état frais comme à l'état durci, ne diffère pas de celui des bétons vibrés, ou bétons ordinaires.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais pour des projets d'envergure [3]. Ces bétons connaissent un essor important, car ils présentent deux intérêts technico-économiques majeurs :

- Une diminution du temps et de personnel lors de la mise en place du béton en chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice

de délais étant donné la complexité sans cesse croissante des coffrages (forme, ferrailage,...).

- L'obtention d'une meilleure qualité du béton in-situ. Pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

Hormis le Japon, l'intérêt des autres pays pour ces bétons n'est apparu que récemment, mais il est en pleine augmentation comme le montre la multiplication du nombre d'équipes dans le domaine et aussi le nombre de publications produites.

En Algérie, ce type de béton présente un intérêt certain puisque les impératifs d'une meilleure qualité des ouvrages et aussi la complexité des coffrages, qui commencent à se sentir de plus en plus ces dernières années, ainsi que la densité du ferrailage imposé par le règlement parasismique notamment dans les zones à fortes sismicité.

C'est dans cette optique, que s'inscrit notre sujet de recherche qui s'articule autour de la conception et la caractérisation des bétons autoplaçants "BAP" fibrés avec ajout, confectionnés à partir d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

En fait, la thèse consiste en l'étude de la formulation de ce type de béton ainsi qu'une investigation sur l'exploitation d'un certain nombre d'ajout cimentaires.

La première action menée dans ce projet de recherche a été de répertorier et de synthétiser tous les documents qui traitent des BAP en général et de leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques en particulier.

La première partie présente l'état de l'art des BAP et BAPF (BAP Fibré) d'un point de vue générale. Les informations présentées relatent plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés intrinsèques aux BAP et des résultats nécessaires à l'évaluation des résultats obtenus dans nos essais expérimentaux. Les particularités de la composition des BAP et des BAPF et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont ainsi abordées puis des données publiées sont citées dans les domaines des propriétés mécaniques. Cette partie a permis d'établir les bases de notre recherche en ciblant les points dépourvus de résultats et en essayant de donner des réponses claires à la faisabilité de fabrication du BAP et BAPF en Algérie

Dans la deuxième partie, deux volets ont été traités. Le premier volet a été consacré à l'étude expérimentale des bétons autoplaçants sans fibres mais avec des additions minérales répandues en Algérie. En premier temps l'addition minérale principale est utilisée comme ajout et en second temps comme ajout cimentaire. Par la suite des BAP contenant un mélange ternaire et quaternaire de poudre, ont été confectionnés. La poudre utilisée, présentant un intérêt récent à l'échelle mondiale, est disponible localement. Une méthode d'analyse par plan d'expérience a été retenue afin d'optimiser les paramètres influençant.

Dans un premier temps, la méthodologie de l'analyse mathématique qui permet de modéliser les effets des facteurs et des interactions sera présentée. Les procédures expérimentales seront écrites dans un second temps.

Dans la perspective d'apporter une contribution à l'amélioration des connaissances dans les domaines des bétons autoplaçants fibrés (BAPF) au moyen d'expérimentations de laboratoire, le second volet de cette deuxième partie, a été dédié, à juste titre, à la formulation de ces bétons à base de différents types de fibres. L'étude des paramètres, tels que la

caractérisation de l'effet des additions minérales et les types de fibres sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques, est particulièrement ciblée.

La présente étude s'est déroulée au sein des laboratoires de l'Unité de Recherche : Matériaux, Procédés et Environnement de l'université de Boumerdès (UR-MPE), du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB), et du Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (CETIM) Boumerdès. Cette étude s'inscrit dans le contexte de la conception des BAP à base de matériaux locaux.

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

BETON AUTOPLAÇANT

I.1. CONCEPT DU BETON AUTOCOMPACTANT

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [1]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais [4, 5]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour acquérir ces propriétés, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure I.1). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

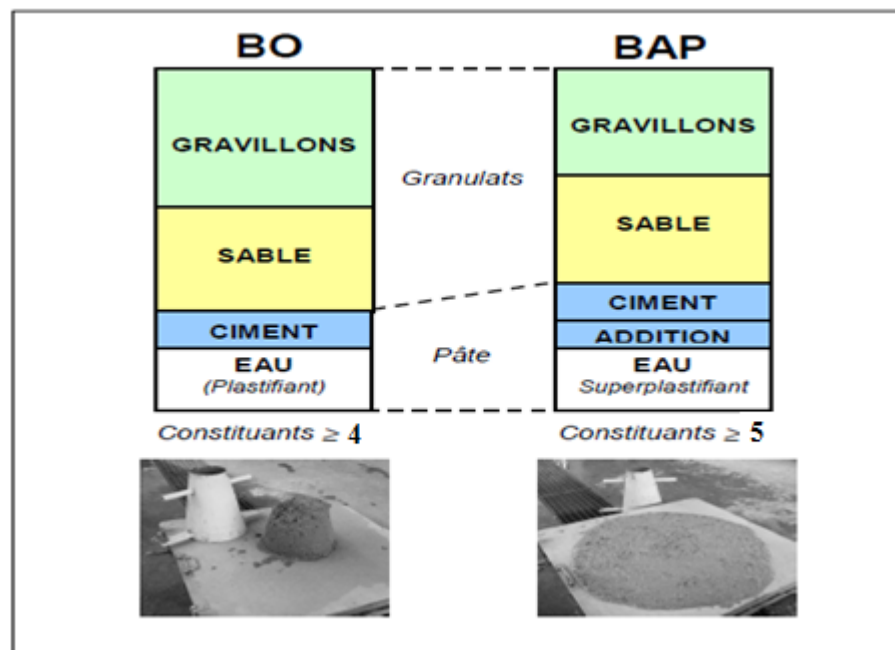


Fig. I-1 – Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [6].

I.2. CAHIER DES CHARGES D'UN BETON AUTOPLAÇANT.

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. En effet ce type de béton doit se caractériser par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable. Ces propriétés contribuent à assurer des structures durables et de qualité.

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP :

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants ;
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement. Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée ;
- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques ;
- De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

I.3. MATERIAUX DE BASE.

Obtenir un parement esthétique de qualité nécessite un matériau facile à mettre en œuvre, homogène et stable et garantissant un bon remplissage du coffrage. Les travaux de recherche menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits autoplaçants (BAP), répondant à ces critères.

Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau se mettant en œuvre sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel de chantier.

Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de formes complexes et pour les structures très ferrillées. Ces bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables sur chantier et, bien évidemment, offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements.

Les BAP doivent présenter une grande fluidité pour pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures). Ils doivent donc offrir une bonne résistance à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) mais aussi une fois en place (ségrégation « statique ») afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables. Ils doivent être stables sous l'effet de la gravité au cours de l'écoulement et dans les phases précédant la prise et le durcissement et permettre la réalisation de parements de qualité.

La formulation des BAP, fait appel à des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation.

Les superplastifiants permettent d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment et assurent le maintien de la fluidité. Les agents de viscosité empêchent le ressuage et limitent la ségrégation en rendant la pâte plus épaisse, une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, fumée de silice) élevée ($\pm 500 \text{ kg/m}^3$) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, un faible volume de gravillons afin d'éviter le "blocage du béton" dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1).

Les granulats ont en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement, du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées), Les nouvelles offres du matériau béton un rapport E/C faible et un dosage en eau limité, éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel/dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.

I.4. DOMAINES D'EMPLOI.

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles ;
- Obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de haute qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe.

Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc.

Walraven [7] précise cependant, que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important. Nous verrons que les différentes précautions à prendre sur chantier et que la composition même du matériau peuvent entraîner un surcoût.

Par ailleurs, Walraven [7] rappelle à juste titre que la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide).

L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure (fig.I-2).

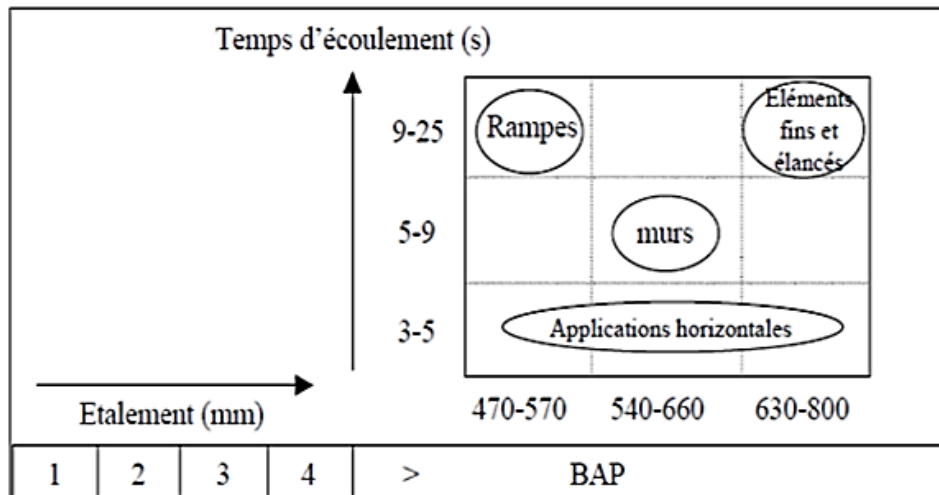


Fig. I-2 – Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [7].

I.5. LES AVANTAGES DES BAP.

Les avantages des BAP sont :

- Très fluides (Classe de consistance S5 au sens de la norme NF EN 206-1) ;
- Absolument homogènes ;
- Mis en œuvre sans vibration ;
- Ils présentent des résistances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels ou à celles des Bétons à Hautes Performances mis en œuvre par vibration.

Pour être utilisés en structure, ils doivent être conformes à la norme NF EN 206-1. Les prescriptions et normes de conception et de dimensionnement des structures s'appliquent aux BAP ; Avec comme principaux objectifs :

- La suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.) ;
- L'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes ;
- Le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferraillées.
- L'allongement des temps d'ouvrabilité ;
- L'amélioration de la qualité esthétique des parements.
- L'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines ;
- La réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers ;
- La réduction des nuisances sonores sur les chantiers ;

- L'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles ;
- La fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement ;
- La diminution des reprises de bétonnage.

Ces objectifs doivent être atteints en conservant à terme pour ce béton, des performances comparables à celles d'un béton traditionnel de même caractéristiques.

L'expertise acquise lors des travaux de recherche sur les BHP et la maîtrise croissante des nouveaux superplastifiants ont permis la mise au point de nouveaux bétons : les Bétons Auto Plaçants (BAP) qui répondent largement à ces exigences.

I.6. PARAMÈTRES AYANT UNE INFLUENCE SUR LE BAP.

I.6.1. Influence des granulats sur les propriétés des BAP.

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

Selon Yurugi et coll. (1989) le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente et plus la capacité de remplissage diminue [8].

Okamura et coll. (1993) mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance aux ségrégations [8, 9 et 10].

Khayat et coll. (1994) ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de 300 l/m³ avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de diamètre maximum 20 mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6 [8, 11].

D'autre part, les études ont montré que le fait de diminuer la taille des granulats concassés jusqu'à un diamètre de 13 mm n'affecte pas la résistance à la compression pour des bétons ($D_{\text{étal}} = 500$ à 600 mm) de rapport E/C de 0.6 contenant 30% en masse de laitier en substitution au ciment avec différents dosages en superplastifiants (4.62% de type naphthalène et 4.62% poly-carboxylique de la masse des liants). Ces bétons autoplaçants développés avec 4% d'air entraîné, présentent une bonne durabilité car le rapport E/C est en général faible. En effet, le retrait par séchage est inférieur de 10 à 20% par rapport à un béton ordinaire (cure de 7 jours à 20°C) ; il varie de 6×10^{-4} à 8×10^{-4} à 26 semaines, ce qui est inférieur à la limite de la norme JASS5 (8×10^{-4}) (Kasai et coll., 1991) (cité par [8]).

Nagataki et coll. (1995) ont optimisé des bétons autoplaçants en étudiant 18 formulations de béton. Ces bétons de rapport E/C de 0.45 contiennent différentes teneurs en gros granulats concassés de diamètre maximum 20 mm (de 24.5 à 34.5%), avec un dosage en ciment portland normal variant de 390 à 450 Kg/m³. les teneurs en superplastifiant (naphthalène) et en agent entraîneur d'air sont respectivement 3 et 0.033% de la masse du ciment. Les bétons développés ont été évalués vis-à-vis de la fluidité (diamètre d'étalement), la résistance à la ségrégation (pourcentage du mortier passant des mailles de 5 mm d'ouverture) et la capacité

de remplissage des coffrages ferraiillés. Egalement les caractéristiques rhéologiques des mortiers correspondants aux bétons étudiés ont été évaluées par la détermination de la viscosité et du seuil de cisaillement. L'étude a permis de définir une marge dans laquelle toutes les recommandations de fluidité et de stabilité sont satisfaites [12].

I.6.2. Influence des additions minérales sur les propriétés des BAP.

Nombreuse sont les études qui ont pour objectif de trouver une bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP) en utilisant divers ajouts minéraux. Les bétons autoplaçant sont des bétons très spéciaux dont les caractéristiques résident essentiellement dans leurs grandes fluidités. Parmi ces études on cite :

- Necira B. a effectué des essais sur des bétons autoplaçants confectionnés avec trois types d'ajouts minéraux (Fillers calcaires FC, Pouzzolane naturelle PZ et le laitier du haut fourneau LT). Il a conclu que l'introduction des ajouts minéraux tels que (FC, PZ et LT) améliore considérablement les propriétés rhéologiques des BAP et que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles au pourcentage d'ajout minéral. Il a conclu aussi que le BAP contenant le laitier du haut fourneau donne des résistances à la compression plus élevées que les BAP contenant les fillers calcaires ou les pouzzolanes naturelles [13].
- Samara M. a étudié la possibilité d'utiliser les sédiments des cours d'eau comme un fillers dans la composition du béton autoplaçant. Il a effectué des essais sur deux types de béton autoplaçant, le premier est à base de fillers calcaires et le deuxième à base de sédiments. Il a observé une perte de maniabilité sur bétons et mortiers à l'état frais, cette perte est due au pouvoir d'absorption d'eau des sédiments liée à la porosité intergranulaire des sédiments traités. Les résistances à la compression sont similaires aux résistances données par les bétons à base de fillers calcaires [14].
- Ayed K. a élaboré à partir d'une même formulation de base, trois BAP de même classe de résistance incorporant chacun un type de fines locales d'Algérie, à savoir des fines siliceuses provenant des déchets de sable siliceux servant à la fabrication du verre, des fines pouzzolaniques naturelles et des fines calcaires. L'analyse comparative des résultats a permis de mettre en évidence l'influence du type d'addition minérale sur le comportement à long terme des BAP [15].
- Rebouh N. a trouvé que l'ajout des cendres volantes dans la composition du béton autoplaçant améliore les caractéristiques de ce dernier, et augmente les résistances mécaniques au jeune âge [16].
- El Hilali A. traite dans son étude l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP frais montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative [17].
- Bouhamou N. et al. ont montré que l'incorporation des fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais à base de matériaux locaux notamment le

sable de mer et le sable de carrière. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP. Les résistances élevées des BAP sont liées au volume de pâte important. L'utilisation du superplastifiant "viscocrete 20HE" dans les formulations autoplaçantes peut avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique. La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques [18].

- Haddad O. et al. ont travaillé sur des mortiers issues des formules de BAP, ces mortiers sont obtenues en faisant varier le dosage en addition de fillers calcaires (15, 30, 50%). Les résultats montrent que l'addition d'un pourcentage différent en fillers n'a pas une influence significative sur l'âge du début et fin de prise. Concernant les résistances mécaniques en compression, ils ont conclu qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de fillers introduit et donc au rapport E/C [19].
- Mébrouki A. a étudié l'influence de l'ajout des fillers calcaires locales d'Algérie (carrière de Kristel d'Oran) sur la pâte autoplaçante. Les pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre constituant de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). La pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler. Il a constaté que l'incorporation d'une quantité importante de fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant (pâte sec ou très ferme). L'ajout de filler dans la pâte de ciment conduit à une diminution de la valeur d'étalement de la pâte et en contrepartie le filler améliore l'écoulement de la pâte [20].

Les fillers calcaires.

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

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

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

- **Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques.**

Neto et Campitelli en utilisant le « tow-points » test pour caractériser la rhéologie de la pâte de ciment qui contient du filler calcaire. Ils observent la réduction du seuil de cisaillement avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire, et aussi l'augmentation de la viscosité plastique au-delà d'une certaine valeur de la finesse du calcaire [21].

Notons que les auteurs ne précisent pas la valeur limite de la finesse du calcaire pour que les résultats soient observés.

Brookbans a étudié l'effet de l'addition de 5 à 28% de poudre calcaire au ciment sur les propriétés du béton frais. Il a observé que le temps de prise est réduit quand on augmente le taux de fillers et que ces derniers réduisent beaucoup la quantité d'eau et probablement n'ont pas un effet d'entraîneur d'air [21].

- **Influence des fillers calcaires sur les paramètres rhéologiques des BAP.**

A. Ghezal [22], a formulé deux bétons autoplaçants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de 3 μm et un ciment portland. Les auteurs ont constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

Ogawa et coll. (1995) (ont développé des formulations de bétons fluides (Détal = 650 ± 30 mm) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C = $0,55 \pm 5\%$, contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 l, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de $51 \pm 1\%$, 8 kg/m³ de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m³ d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage rapporté par [8].

I.6.3. Influence des ajouts chimiques sur les propriétés des BAP.

Les adjuvants sont des additions qui sont incorporées durant le malaxage pour améliorer les caractéristiques du béton (fluidité, plasticité, propriétés rhéologiques). Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité [1].

- **Les superplastifiants.**

Les superplastifiants 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. Ceci permet de libérer une partie de l'eau qui a été piégée par les grains de ciment floculés et diminue ainsi les frictions intergranulaires. On assistera alors à une amélioration de l'ouvrabilité du béton.

En général, les superplastifiants utilisés dans les formulations des BAP sont du type polyméline sulfoné, polycarboxylate ou de naphtalène sulfonate.

Y.Miura et al. ont étudié les propriétés d'un mortier autoplaçant avec un nouveau fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères. Les auteurs ont comparé les propriétés rhéologiques d'un mortier de E/C = 0,5 adjuvanté par le FPC, un fluidifiant de type polycarboxylate PC et un fluidifiant de type naphtalène sulfonate NS [23].

Pour un étalement de 240mm, ils ont constaté que le dosage en PC et en FPC est plus faible que celui d'un NS. Par ailleurs, la viscosité plastique est plus élevée avec le FPC.

Kazuhisa et al. Ont utilisé un nouveau fluidifiant, le NPC, dans les formulations des BAP, les auteurs ont aussi comparé le NPC avec d'autres fluidifiants comme le NS et le MS.

Les résultats montrent que pour un étalement de 250 mm, le dosage en NPC est beaucoup plus faible que le dosage en NS et MS.

Ils remarquent que l'étalement est augmenté significativement pour un rapport E/C compris entre 0,3 et 0,4 lorsque le NPC est augmenté de 0,05% à 0,1%.

- **Les agents de viscosité (ADV) ou agents Colloïdaux.**

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés.

La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (fig.I-3).

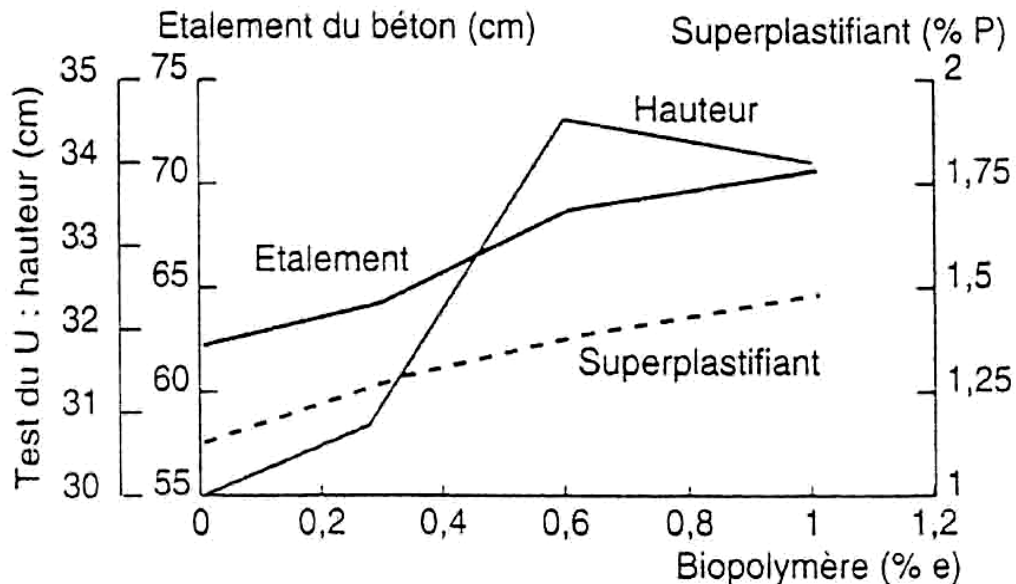


Fig. I-3 – Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant [24].

Ces produits sont des hypocycloïdes extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Les produits les plus utilisés pour la formulation des BAP sont :

- Les dérivés cellulosiques : "hydroxy propyl méthyle cellulose" (HPMC) ;
- "Hodroxyethyl cellulose" (HEC), "carboxy méthyle cellulose" (CMC) ;
- Les polymères les issus de la biotechnologie, qui sont des polysaccharides obtenus par fermentation (gomme de Xanthane de welan, biopolymère p3,...).

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons, par contre ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants [25]. Les types les plus utilisés sont des dérivés de cellulose et de polysaccharides de source microbienne. Ce sont des polymères solubles dans l'eau qui forment des solutions visqueuses par adsorption des longues chaînes sur la périphérie des molécules d'eau. En outre, les molécules adjacentes des chaînes de polymères peuvent développer des forces attractives entre elles et bloquer le mouvement de l'eau en causant un gel et l'accroissement de la viscosité (Izumi, 1990). Les agents colloïdaux maintiennent aussi l'uniformité du béton au cours de sa déformation en évitant l'accroissement local des contraintes dû au rapprochement des gros granulats [8].

Certains auteurs, proposent d'autres agents de viscosité pour la formulation des BAP. Selon ces derniers les polysaccharides sont difficiles à disperser dans un béton et leur dispersion dans l'eau pourrait induire une attaque bactérienne de la solution, ce qui limiterait

le temps d'utilisation. Les auteurs proposent l'utilisation, combinée de silice précipitée (particules de dimension 50 μm) renfermant 20% de matière sèche et de polysaccharide dispersé dans une huile végétale.

A. Ghezal a utilisé des BAP de 450 kg/m^3 et de 570 kg/m^3 de liant avec différents dosages en superplastifiant et différents dosages en agent colloïdal (gomme de welan), et un rapport E/L qui varie entre 0,42 et 0,45 [22]. L'auteur remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation du dosage en agent de viscosité et il a constaté que quatre facteurs principaux sont capables d'entraîner un effet très significatif : le dosage en liant, le rapport E/L, le dosage en superplastifiant et le dosage en gomme de welan. Les résultats trouvés sont présentés dans la figure I-4.

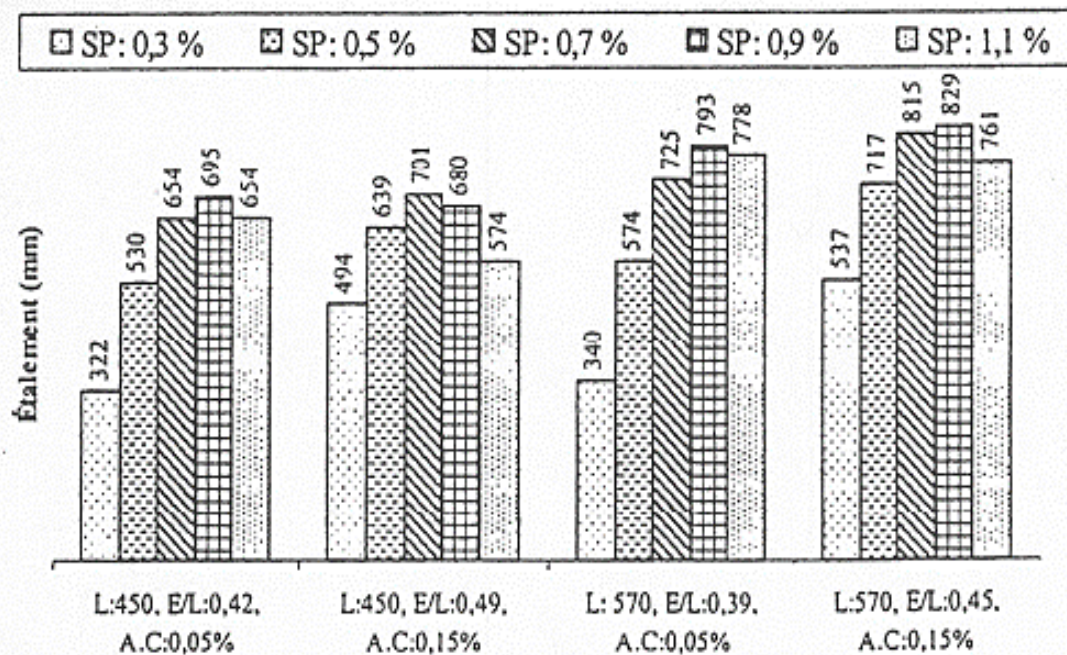


Fig. I-4 – Influence des Agents de viscosité et des Superplastifiants sur l'ouvrabilité des BAP [22].

Au niveau de la stabilité, les bétons contenant des superplastifiants et des agents colloïdaux présentent moins de ressuage. Par exemple Kasai et coll. (1991) rapporté par [8] ont développé des bétons fluides (Détal = 500 à 600 mm) de rapport E/C de 0,6 et contenant 30% de remplacement massique du ciment par du laitier avec différents dosages de mélanges (A et B) de superplastifiants et d'agent colloïdal combinés (4,62% de type A et 4,62% B de la masse des liants). Ils ont enregistré un ressuage de 0,3 ml/cm² (essai réalisé sur un cylindre de diamètre 15 cm et de hauteur 30 cm, le moyen de mesure n'est pas déterminé).

D'autre part, une étude faite par Yurugi et coll. (1989) sur un mortier avec différents dosages en agent colloïdal à base de glucose (dosage variant de 0 à 0,05% du volume de l'eau) et de superplastifiant (dosage variant de 1,2 à 3% de la masse de liant) a relevé que le ressuage était nul quand la teneur en agent colloïdal dépasse 0,03% (les caractéristiques du mortier n'ont pas été spécifiées) [8].

Fukute et coll. (1995) ont développé un béton fluide (E/C = 0,48) fait avec un ciment à base de laitier et ont utilisé un agent colloïdal fait avec de la cellulose (dosage de 0,3% de la masse de l'eau), un superplastifiant à base de polycarboxilique (dosage de 3% de la masse du

ciment), et un AEA (dosage de 5,8 kg/m³). Les gros granulats ont un diamètre maximum de 20 mm. Ils ont recommandé un diamètre d'étalement de 650 ± 5 cm, une vitesse d'étalement horizontal inférieure à 3,3 cm/s et une différence de hauteur dans le "Box test" de 2 cm. L'étude de la résistance à la ségrégation pour le cas de l'étalement horizontal, a montré que le béton développé est uniforme. Ceci est attribué à la combinaison de l'agent colloïdal et du superplastifiant qui améliorent respectivement la déformabilité et la résistance à la ségrégation du béton. Les temps de prise initial et final ont été prolongés de 2 à 3,5 heures par rapport au béton témoin ordinaire (E/C = 0,55 ; prise initiale à 6 heures). Ceci a été attribué à la présence de l'agent colloïdal et du superplastifiant [8].

Ces bétons fluides développés ont présenté des résistances à la compression par fendage et des modules d'Young comparables aux bétons ordinaires (E/C = 0,55). La variation de ces propriétés suivant la longueur d'étalement horizontal est également minimale (L = 7,2 m). Les profondeurs de pénétration des ions chlore et de la carbonatation sont plus faibles pour les bétons fluides développés (E/C = 0,48) que pour les bétons ordinaires (réduction de 2 mm).

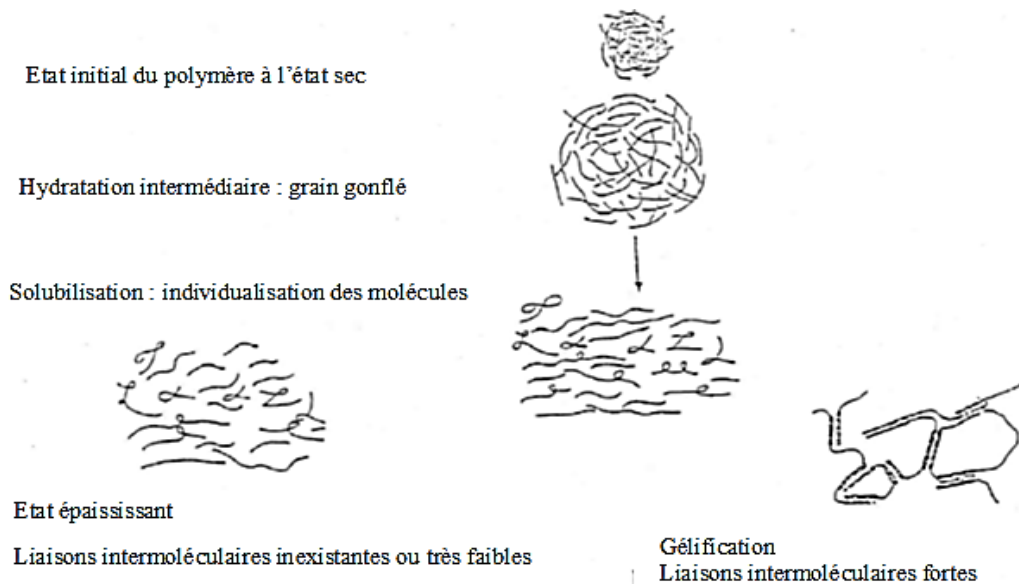


Fig. I-5 – Interaction entre l'eau et les polysaccharides.

D'après l'AFGC, l'utilisation des agents viscosant se justifie dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne seraient pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. De nouveau, la complexité des propriétés visées et des matériaux employés démontre la nécessité de trouver un compromis lors de la formulation d'un BAP. Différents auteurs se sont intéressés à cette étude et ont proposé des méthodes de formulation de BAP présentées dans la partie suivante.

I.6.4. Influence du dosage en ciment.

Dans la formulation d'un Béton Autoplaçant (BAP), la proportion de pâte – eau, ciment, additions et adjuvants – est souvent considérée comme un paramètre essentiel en ce qui concerne la consistance et les propriétés mécaniques (AFGC, 2000). Puisque la pâte est la phase poreuse du béton, sa proportion dans le matériau a aussi des effets sur les propriétés de transfert. Par conséquent, il est a priori nécessaire de prendre en compte la proportion de pâte vis à vis de la durabilité.

I.6.5. Influence de la taille maximale des gravillons.

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer la quantité optimale en gros granulats capable de donner un maximum d'ouvrabilité au béton. Ces études ont analysé l'impact de cette optimisation du béton à l'état frais sur les propriétés du béton durci.

Selon Yurugi et coll. (1989), le volume de gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente, plus la capacité de remplissage diminue. Ayant comme critère de base qu'un béton auto-nivelant devait avoir entre 600 et 700 mm d'étalement et plus de 60% de capacité de remplissage, ils ont en effet réalisé des formulations de béton autonivelant (diamètre d'étalement (D étal) = 560 à 730 mm, E/L = 0.30 à 0.35) contenant du filler calcaire (30 à 40 % de la masse du liant), un agent colloïdal à base de glucose (dosage de 2.6 à 4 % de la masse du liant). Les granulats utilisés étaient concassés et avaient un diamètre maximum de 20 mm [26].

Okamura et coll. mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un béton autonivelant est de limiter la teneur en gros granulats, car les bétons frais à faible dosage en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance à la ségrégation [9].

Khayat et coll. ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capable d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et superplastifiant. la quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de 300 l/m³ avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de granulats de diamètre maximum 20 mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport sable/pâte (volumique) de 0.6 [11].

Miura et coll. (1993) ont étudié l'influence de la teneur en gros granulats (diamètre maximale de 20 mm) sur le temps d'écoulement à travers un entonnoir circulaire. Ils trouvent que, pour des volumes de gros granulats dépassant 380 l/m³, on assiste à des collisions et des frictions intergranulaires à la sortie de l'entonnoir [27].

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (fig.I-6).

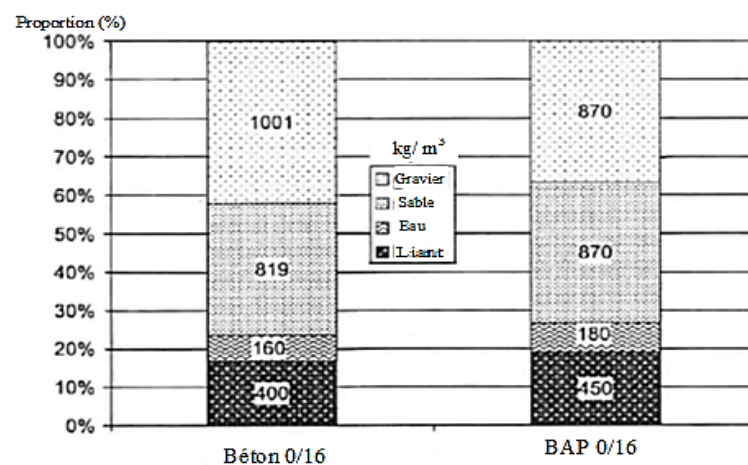


Fig. I-6 – Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré [27].

I.6.6. Influence du rapport E/C.

En plus de son rôle majeur dans le phénomène d'hydratation, l'eau est un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité de béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent. Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais [28].

Le dosage du ciment dans le béton influe sur ses propriétés mécanique et sa durabilité. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont liés au rapport E/C qui représente un facteur très influent sur ces différents aspects, aussi la formation des bétons passe par l'optimisation de ce paramètre.

CONCLUSION.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplaçants : De nombreuses structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de béton se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, étalement et air occlus), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de la durabilité. Ainsi, des bétons autoplaçants (BAP) ont été développés afin que la mise en place soit réalisée sans vibrations, seulement sous l'effet de la gravité, d'où le qualificatif d'autoplaçants

BETON AUTOPLAÇANT FFIBRE

II.1. INTRODUCTION.

Depuis les découvertes dans le domaine des bétons, une multitude de constructions a été réalisée avec ce matériau cimentaire modifié. La fabrication d'une large quantité de dallages industriels a été exécutée avec des dosages en fibres de 20 à 60 kg/m³. Contrairement au béton conventionnel, les fibres permettent le transfert de forces à travers de larges ouvertures de fissures et impliquent ainsi un comportement ductile [29].

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu sous forme de fibres. C'est un matériau composite qui se présente sous forme d'un solide polyphasé dans lequel deux ou plusieurs constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne permettent pas d'atteindre.

L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibres isolées au moment de gâchage (béton de fibres) ou de la projection (cas de béton de fibres projeté). Il peut aussi contenir des ajouts minéraux ou autres adjuvants généralement utilisés avec le béton autoplaçant qui présente une solution prometteuse. En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité.

L'addition des fibres a une influence directe sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. D'après Groth [30], cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement.

D'après Peiffer [31-32], la longueur optimale d'une fibre doit être égale à deux fois la longueur d'ancrage L_c de façon à avoir un bon comportement mécanique du point de vue de l'arrachement ou de la rupture de la fibre.

II.2. COMPOSITION DES BAPF.

La composition de mélange du béton autoplaçant renforcé de fibres est souvent un compromis entre conditions sur l'état frais et durci : Une diminution soudaine d'ouvrabilité se produit à un certain contenu de fibre, qui dépend de la composition du mélange et de type de fibre. Les paramètres touchant sur le comportement du béton dans l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAPF [33].

II.3. FORMULATION DES BAPF.

La conception du mélange est souvent basée sur quelques principes de base :

augmenter la teneur en pâte, le dosage en superplastifiant et le contenu des granulats fins à l'allongement et au volume croissant de fibres. ROSSI, HARROUCHE et HOY [34] ont approché la conception du mélange des matrices de béton autoplaçant renforcé de fibres sur

une façon plus systématique : ils ont optimisés le squelette granulaire, le contenu et les caractéristiques de la pâte doit être tenue en compte pour lier l'ouvrabilité et la composition du mélange. La distribution homogène et l'orientation des fibres sont souvent assurées mais rarement étudiées. La condition sur les caractéristiques principales du BAP demeure la même pour les BAPF ; l'obtention des BAPF peut être faite de différents points de : la capacité de remplissage ; le comportement de post-fissuration ; la classe de résistance à la flexion par fendage et les coûts.

ROSSI et HARROUCHE ont proposé une méthode de conception pour optimiser le squelette granulaire du béton de tissu renforcé qui a été basé sur la méthode Baron-Lesage. Ils ont fait toute prétention : d'abord, le béton le plus réalisable est obtenu au cas où le squelette granulaire serait optimisé. En seconde lieu, le premier juge varie indépendamment de la nature ou du volume de la pâte de ciment [33].

II.4. COMPORTEMENT MECANIQUE DES BAPF.

Pour améliorer quelques propriétés mécaniques des bétons autoplaçants (résistance à la traction, à la flexion, ductilité...), des fibres sont incorporées. Ce renforcement peut influencer le comportement de ces derniers à l'état frais et durci. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration. Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres. La démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres.

L'effet des propriétés des fibres qui ont une influence directe sur les propriétés mécaniques des BAPF tel que la flexion et la compression et qui ont fait l'objet de quelques recherches sont résumés ci-après :

- **Effet du volume des fibres**

Pour les bétons fibrés, le concept de la ductilité est souvent utilisé pour caractériser leur rendement [35]. L'objectif principal de l'utilisation des fibres dans les matériaux composites (béton, mortier...) est l'amélioration du comportement structural en traction.

KHAYAT et al.2000 [36] ont noté une amélioration de la résistance à la flexion de prismes 100×100×350 mm des BAPF par rapport au béton conventionnel.

MUELLER [37] GAO et al. [38] trouvent que l'une des raisons de l'augmentation de la résistance en flexion est le volume des fibres V_f . Le V_f est le paramètre responsable direct sur le comportement de la matrice BAPF à l'état durci.

YADEGARAN et al. [39] ont prouvé que l'inclusion de fibres synthétiques de 12 mm de longueur dans les BAP réduit la résistance à la compression à différents âges. DREUX et al. 2002 [40] ont conclu que les fibres augmentent la résistance à la compression. SAHMARAN et al. 2005 [41] ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du volume des fibres surtout dans le cas où les fibres sont de petite taille. Par contre BANTHIA et al. 2000a [42] et ZHANG et al. [43] ont observé que l'effet des fibres sur les BAP n'est pas clair ou sensible.

- **Effet de la longueur des fibres**

Les travaux entrepris par ZHANG et al. [43] sur le béton pour les applications de béton projeté contenant 60% de cendres volantes en substitution partielle avec le ciment, a montré

que l'augmentation de la longueur des fibres L_f a conduit à une augmentation de l'indice de ténacité, et par conséquent une augmentation de la résistance résiduelle à 14 jours d'âge. Mais, un résultat inverse inexplicable a été obtenu à 91 jours. Les différents essais ont montré que la résistance à la flexion du béton de fibres est indépendante de L_f [40]. ZHANG et al. ont constaté que la charge de la fissure était légèrement influencée par des fibres de polypropylène. DREUX et al. [40] ont mentionné que les différents tests ont prouvé une légère augmentation de la résistance à la compression lors de l'utilisation des fibres courtes en raison de leurs meilleures homogénéités dans la matrice béton.

- **Effet de l'aspect ratio et la forme géométrique**

L'aspect ratio (L_f / d_f) affecte également le comportement en flexion du béton. Cependant, l'influence de ce paramètre sur lui-même dépend du V_f et la géométrie de la fibre. Généralement, pour les bétons ordinaires, la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation de L_f / d_f [44]. Avec l'utilisation de diverses formes de fibres, il est difficile de séparer l'aspect ratio de la géométrie des fibres. Pour un L_f / d_f donné, la ténacité des bétons de fibres varie sensiblement fonction de la géométrie des fibres utilisées [44]. BALAGURU et al. [45] ont suggéré pour les bétons ordinaires (30 MPa), que les fibres les plus performantes sont : les fibres à crochets, embouties aux extrémités, ondulées, et les fibres droites. GAO et al. [38] ont observé que la ténacité à la flexion augmente avec l'augmentation de la L_f / d_f . Luo et al. [46] ont étudié l'effet de cinq types de fibres d'acier avec différents L_f / d_f et V_f sur la résistance à la compression. Les auteurs ont constaté que lorsque l'aspect ratio augmente, la résistance augmente. Des résultats similaires ont été trouvés par GAO et al. [38] en utilisant des fibres d'acier dans les bétons légers et à haute résistance.

II.5. INFLUENCE DES FIBRES SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES BAP.

II.5.1. Essai d'étalement.

L'analyse bibliographique montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans composition de référence. On remarque sur la Figure II-1-a une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface, ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions (voir Figure II-1-b) avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La Figure II-1-c illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu

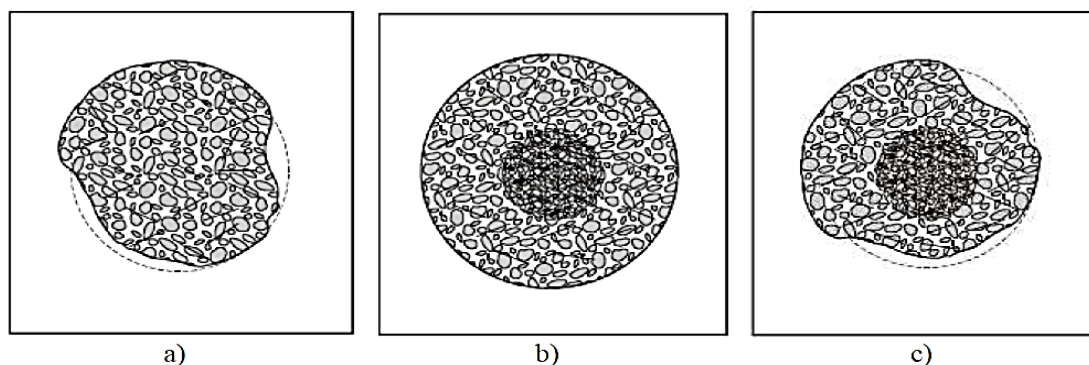


Fig. II-1 – Effets des fibres sur l'étalement des BAP [47].

Sachant que l'élanement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, Grünewald et Walravens 2001a [47] se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres V_f et l'élanement. La Figure II-2 décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

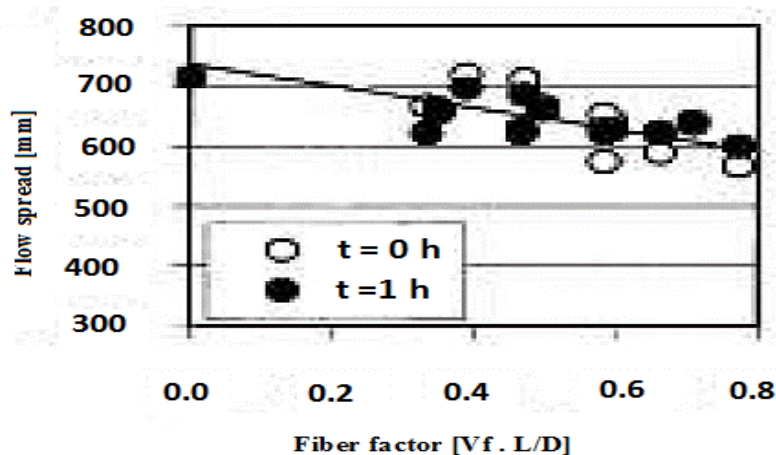


Fig. II-2 – L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [48].

II.5.2. Essai de V-funnel.

Grünewald a trouvé que les temps d'écoulement à travers l'entonnoir (V-funnel) pour les différentes compositions directement après malaxage sont dans une gamme comprise entre 4,5s et 5,7s [48].

On note sur la Figure II-3 une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulat par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. Les temps de passage à travers l'entonnoir à $t=1h$ sont nettement plus élevés qu'à $t=0$ heure.

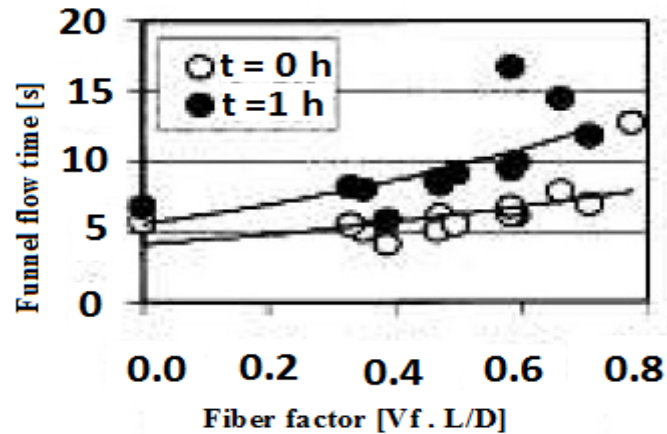


Fig. II-3 – L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres [48].

II.5.3. Essai J-RING.

Le J-Ring est un essai d'étalement modifié par les japonais pour évaluer la sensibilité au blocage des bétons fibrés dans le milieu confiné notamment par les armatures. Les fibres affectent de manière significative la capacité de passage par rapport à la composition de référence sans renfort de fibres. L'espacement exigé des barres pour le non blocage augmente avec le dosage en fibre. Dhonde et al 2007 ont réalisé une étude sur le comportement à l'état frais des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques et ont conclu que l'écoulement est obstrué par les barres, ce qui crée une différence de niveau entre le béton restant à l'intérieur de l'anneau et celui passé à travers. L'élanement de la fibre, la teneur des granulats (fins ou gros) et les caractéristiques rhéologiques de la pâte de ciment affectent également ce comportement [29].

Tableau II-1– Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAPF [49].

c/Lf [-]	Lf/df [-]	Max. mf [kg/m ³]
≥ 3	80	30
	65	60
≥ 2	65	30
	45	60
≥ 1,5	45	30

Avec :

c : espacement entre les barres.

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

II.5.4. Résistance à l'écoulement (relation entre la teneur en fibre et la viscosité plastique).

Grünewald et Walravens 2001b [47] ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité

plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1 %, la viscosité plastique accroît avec une pente très faible. Au-delà de cette valeur, cette dernière devient nettement plus grande et l'écoulement du béton frais est quasi nul justifiant ainsi la consistance élevée du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues [50].

II.6. ORIENTATION ET DISTRIBUTION DES FIBRES.

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Petersson 1998 a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats. Par ailleurs, il a été constaté que la majorité des fibres étaient orientées dans le sens de l'écoulement ; cet effet était plus prononcé pour des fibres de plus grande longueur [51].

Groth et Nemegeer 1999 a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion [52] cité par [53].

II.7. UTILISATION DES BAP FIBRES DANS LES STRUCTURES.

Les Différentes applications de BAPF sont présentées dans le tableau II-2 :

Tableau II-2 – Domaines d'application.

Applications	Intérêt apporté par l'adjonction des fibres dans le béton
Canalisation et coques minces faiblement sollicitées	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations
Dallages, chaussées en béton, Dallages manufacturés, et tous éléments structuraux soumis à la flexion	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - L'augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations, ...etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture catastrophique
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles ex: piste d'un aéroport	<ul style="list-style-type: none"> - L'énergie absorbée est plus importante - La durée de choc est augmentée - Loi de comportement du matériau est fortement modifiée
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement avec succès du revêtement réfractaire - Diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	<ul style="list-style-type: none"> - Évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé. - Diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus,

II.8. LES FIBRES.

II.8.1. Les différents types de fibres.

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

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

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

Les fibres métalliques.

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



Fig. II-4 – Différents types de fibres métalliques.

Les fibres de polypropylènes.

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

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

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



Fig. II-5 – Fibres de polypropylènes.

II.8.2. Le rôle des fibres.

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

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures (fig. II-6-a) ;
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (fig.II-6-b).

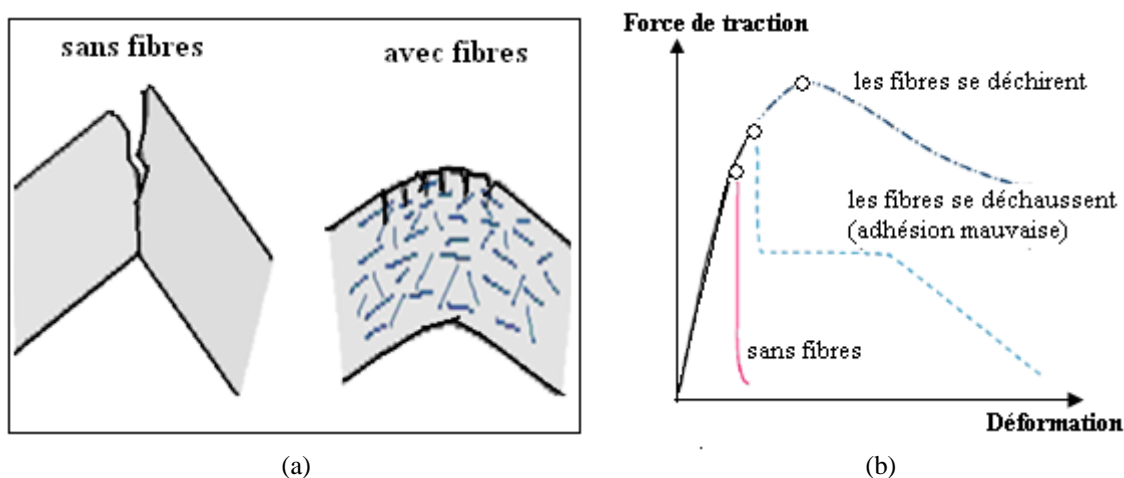


Fig. II-6 – Illustration de l'apport du renfort par des fibres [54].

Pour bien comprendre le rôle joué par les fibres, il faut préciser que le terme « fibre » est ici réservé à des matériaux d'une longueur d'environ 60 mm (fibres courtes), par opposition aux armatures du béton armé (barres, rubans, treillis soudés).

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile.

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives a :

- La cohésion du béton frais ;

- La déformabilité avant rupture (rupture ductile) ;
- La résistance aux chocs ;
- La résistance à la fatigue ;
- La résistance à l'usure ;
- La résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- La réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et microfissures.

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architectural.

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

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

II.8.3. Influence des fibres sur les propriétés des BAPF à l'état frais.

Grunewald a réalisé un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, des conclusions ont été tirées :

Grünewald 2004 [55] mentionne qu'une augmentation de la limite d'élasticité est fonction de l'augmentation du volume des fibres dans les BAP. Parallèlement, Grünewald et al 2001 [56] ont rapporté que pour obtenir un affaissement donné, la longueur des fibres doit être réduite avec l'augmentation du volume des fibres ; en d'autres termes, pour un type de fibre donné, le taux d'affaissement diminue avec l'augmentation du volume des fibres.

Sahmaran et al. 2005 [41] ont étudié l'effet de la combinaison des fibres métalliques de différentes forme et nature sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les auteurs concluent que la maniabilité est fonction des propriétés des fibres (volume, longueur, aspect ratio et la forme).

Khayat et al. 2000 [57] ont rapporté que l'inclusion des fibres dans les BAP pourrait modifier de manière significative les propriétés rhéologiques par leurs formes et leurs interactions avec les agrégats, par conséquent une augmentation de la résistance à l'écoulement.

Les auteurs ont noté que l'essai d'affaissement et d'écoulement ne sont pas des paramètres rhéologiques suffisants pour évaluer la déformabilité des BAPF. Ils recommandaient l'essai de V Funnel, pour évaluer la déformabilité dans un milieu confiné, surtout dans le cas où le volume des fibres est important.

Kassimi 2008 [58] a montré que l'incorporation d'un volume de fibre dépassant les 0.5% affecte les propriétés rhéologiques et donne un BAP semi-fluide.

II.8.4. Propriétés mécaniques des fibres métalliques.

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

Leur géométrie est très variable (figure II-7). 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 [59] 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.

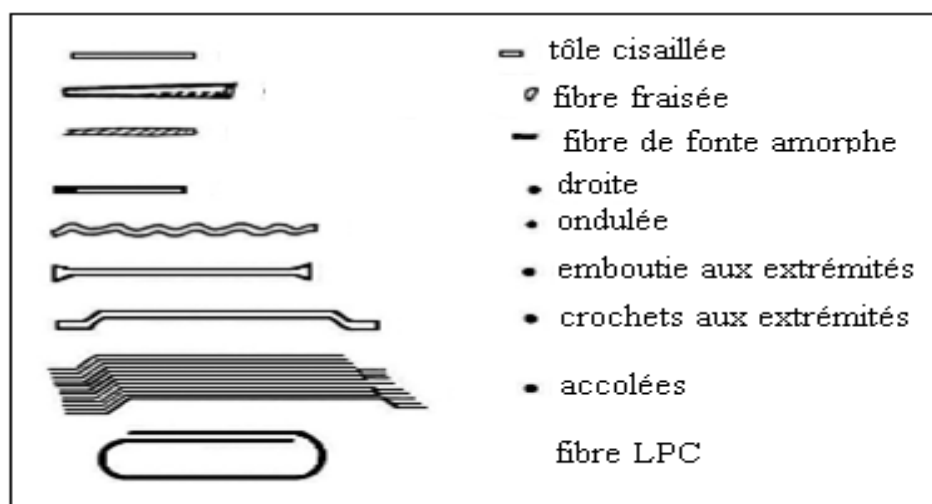


Fig. II-7 – Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

CONCLUSION.

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, du béton projeté ainsi que le renforcement du béton autoplaçant. Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous diverses formes et dimensions (rondes, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6 et 150 mm tandis que l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75 mm. Chacune de ces catégories de fibres procure au béton des propriétés spécifiques mais, en général, il serait suffisant de vouloir parler de béton renforcé de fibre.

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte. Le paramètre numérique le plus fondamental décrivant la fibre est son élancement qui est défini comme le rapport entre la longueur et le diamètre (l/d) équivalent à la fibre. Il est considéré comme l'un des paramètres les plus importants dans la technologie des bétons renforcés de fibres, comme son rôle prépondérant sur la maniabilité du béton.

Donc la fonction principale des fibres dans le béton est de réduire l'ouverture et la propagation des fissures en état de service et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile (accroît la sécurité aux ELU).

FORMULATION DE BETON AUTOPLAÇANT

III.1. ASPECT EMPIRIQUE DE LA FORMULATION DES BAP.

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple).

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants [60, 12] ;
- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [61]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établi certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous :

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) ;
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- Un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- Un diamètre maximal réduit ;
- Éventuellement utilisation d'un agent viscosant.

Les auteurs [60, 61] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

III.1.1. Approche basée sur l'optimisation des mortiers.

Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [1] :

- Une quantité de gravillons limitée ;
- Un rapport eau/poudre faible ;
- Utilisation d'un superplastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [10, 62]. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers. Un étalement relatif (Γ_m) est déterminé à l'aide de l'essai au mini-cône et une vitesse d'écoulement relative (R_m) est déterminée par un essai au V-funnel pour mortier :

$$\Gamma_m = (d^2 - d_0^2) / d_0^2$$

$$R_m = 10/t$$

d^2 est le diamètre de la galette de mortier,
 d_0 est le diamètre inférieur du cône,
 t est le temps d'écoulement du mortier.

Les auteurs ont montré qu'il existait une relation linéaire entre Γ_m et R_m pour un dosage en superplastifiant donné et quand le rapport eau/poudre varie. Pour formuler un BAP acceptable, il faut obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$ [10,62].

Edamatsu et al. proposent une méthode pour évaluer les interactions entre le sable ou les poudres du mortier et les gros granulats. Ils montrent qu'en faisant varier les paramètres Γ_m et R_m dans une certaine gamme, le rapport R_{mb}/R_m est constant. R_{mb} est la vitesse d'écoulement relative du béton modèle composé du mortier étudié ainsi que 20% de billes de verre de 10 mm de diamètre. À partir de ce rapport, les auteurs déclarent qu'il est possible d'évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre) [63].

III.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte.

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

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter le problème de blocage [64]. Van Bui et Montgomery présentent une méthode de formulation basée sur l'optimisation de la quantité de pâte [65]. Ils montrent que :

- Il existe une quantité de pâte minimum pour éviter les blocages lors de l'écoulement ;
- Il existe une quantité de pâte minimum pour assurer la maniabilité du mélange.

La quantité de pâte minimum pour éviter les risques de blocage, soit la quantité de granulat maximum est calculée selon l'expression :

$$Vab_{max} = \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g)Nga}{\sum \frac{Pvg_m \cdot Nga \cdot \rho_s}{Vab_m} + \sum \frac{Pvs_n \cdot (1 - Nga) \cdot \rho_g}{Vab_n}}$$

Avec ρ_g masse volumique des gravillons,

ρ_s masse volumique du sable,

Nga pourcentage de gros gravillons,

Pvg_m et Pvg_n rapport entre le volume des gros granulats de classe m (respectivement des granulats fins de classe n) sur le volume total de granulats,

Vab_m et Vab_n respectivement les volumes bloqués des granulats de classe m et n.

Ils prennent en compte la distance entre armatures (c) et le diamètre d'une fraction granulaire d_i tel que :

$$Dca = \frac{c}{d_i}$$

$$\text{Avec } d_i = M_{i-1} + \frac{3}{4}(M_i - M_{i-1})$$

M_i et M_{i-1} M sont les dimensions des tamis encadrant la classe granulaire i.

Par ailleurs, la quantité de pâte minimum requise pour obtenir une certaine fluidité est calculée par :

$$Vpd_{min} = Vt - \frac{Vt - Void}{\left(\frac{Dss_{min}}{Dav} + 1\right)^3}$$

III.1.3. Approche 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.

Lorsque la phase interstitielle est occupée par l'eau de gâchage, plus cette quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité 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.

De Larrard et Sedran 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. À l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton [10, 66, 67].

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi 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.

III.2. METHODES DE FORMULATION DES BAP.

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP commencent à apparaître dans la littérature.

La particularité des BAP réside essentiellement dans leurs propriétés à l'état frais. Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids et avec un débit suffisant. Ceci se traduit dans la pratique par un étalement et une vitesse d'étalement importants. D'un point de vue plus scientifique et considérant que le béton est fluide de Bingham, ceci se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. Ces grandeurs rhéologiques peuvent être mesurées à l'aide d'un rhéomètre à béton comme BTRHEOM-LCPC, par exemple.

Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, à travers des zones confinées et une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée.

Un BAP doit également avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celle situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition des fissures. Ajoutons, enfin, que ces bétons sont généralement pompables.

En conclusion, la principale difficulté à laquelle le formulateur de BAP est confronté est de pouvoir concilier des propriétés a priori contradictoires : la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Le formulateur doit donc établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation.

III.2.1. Approche Japonaise.

Les chercheurs de l'université de Tokyo Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al. ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants [68, 69].

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50 % de leur compacité (les chercheurs ne précisent pas dans leur article comment la compacité est mesurée). Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats [1, 59]. Les

bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (figure III.1). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

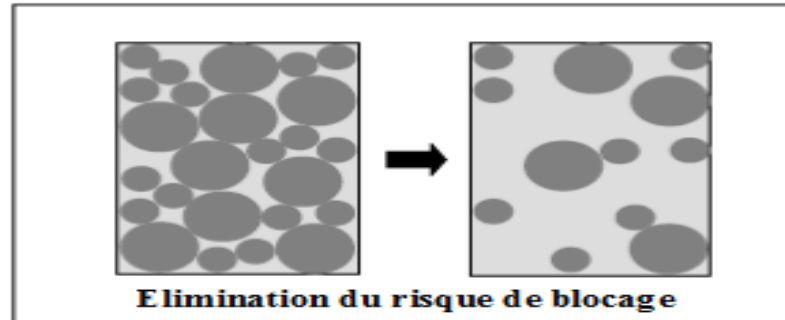


Fig. III-1 – Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité.

À défaut d'indication, ils ont choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC [70].

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m^3 . Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, ils choisissent de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

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

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

Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier (fig.III-2.a) et des mesures d'écoulement à l'entonnoir (fig.III-2.b).



(a) Cône à mortier



(b) Entonnoir à mortier

Fig. III-2 – Essais d'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sur mortiers.

Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation 2.1,

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2}$$

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

$$T = \frac{10}{t_e}$$

Où t_e : est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

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

Lors des essais sur mortiers de Philippe Turcry, il a préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m^3 , ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams. La figure III.3 présente le résultat de la recherche du couple eau / superplastifiant. L'étalement normalisé D optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1. Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.

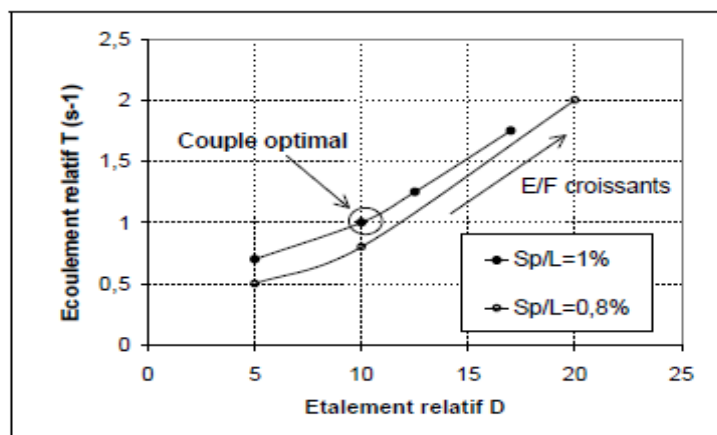


Fig. III-3 – Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D [70].

Sur la fig.III.3 la flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle.

III.2.2. Approche suédoise.

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise (Okamura), le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées.

Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats.

III.2.3. Approche de la JSCE.

Cette méthode a été proposée par la Japanese Society of Civil Engineers en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité.

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

- La quantité de gros granulats varie selon l'autocompactibilité recherchée et le diamètre maximum est limité à 20 mm voire 25 mm ;
- Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/m³ dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/m³. En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/m³ ;
- Le rapport eau/poudre est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau/poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 % ;
- La quantité de poudre se déduit du rapport eau/poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 m³/m³. Dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19 m³/m³ ;
- Le volume d'air dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air ;
- La quantité des fines est déduite des quantités précédentes ;
- Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m³, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines).

III.2.4. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC.

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions du mélange ;

- La compacité propre ;
- La densité apparente.

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton ;
- Choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage) ;
- Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé par exemple).

III.2.5. Application de la méthode des plans d'expériences.

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables :

La réponse : grandeur physique étudiée ;

Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes :

- Déterminées à priori ;
- Obligatoirement réalisables ;
- Indépendantes entre elles.

La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. Une relation de modélisation en est alors déduite.

Les deux principales utilisations possibles de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE) sont :

- La technique du screening. Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, cet outil permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. On procède ainsi implicitement à une simplification du problème. On recherche pourquoi la réponse varie (en fonction de quels facteurs) ;
- La méthodologie des surfaces de réponse.

Les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative, le but étant de déterminer comment la réponse varie.

Pour connaître les évolutions des variables caractéristiques du problème, leurs interactions, leurs influences sur les grandeurs étudiées, nous avons appliqué dans ces travaux la formalisation conférée par la méthode des plans d'expériences (MPE).

Ce terme désigne en définitive une méthodologie complète pour la caractérisation comportementale d'un système. Elle est basée sur la modification et la mesure des variables propres ; cela comprend principalement les grandeurs étudiées ainsi que leurs sources de variation. Elle permet de déterminer les relations existant entre ces 2 groupes de variables, en établissant les relations analytiques des liant. Suivant le type de ces modèles mathématiques, l'expérimentateur peut en déduire des informations plus ou moins précises, qualitatives ou quantitatives.

CONCLUSION.

Le processus de Formulation d'un béton c'est de tenter, au moindre coût, de trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges exprimé en grandeurs mesurables.

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis.

Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS

IV.1. PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT FRAIS.

IV.1.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP.

Pour évaluer les propriétés et les qualités à l'état frais d'un béton autoplaçant, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés. Certains évaluent la consistance et la déformabilité, tandis que d'autres s'intéressent aux mesures de la stabilité du béton.

De nombreux tests simples ou empiriques ont été mis au point. Ces tests ont pour but de mieux caractériser le comportement du béton autoplaçant ou de valider son utilisation.

Tableau IV-1 – Les propriétés essentielles des BAP frais. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP [11].

<p>Pour une excellente déformabilité</p>	<p>L'augmentation de la fluidité de la pâte : Par l'utilisation de superplastifiants haut réducteurs d'eau ; Par l'adoption d'un optimal rapport eau/liant, La réduction des frictions granulaires : En diminuant le volume de gros granulats (un volume de pâte élevée). En utilisant un liant de granularité continue</p>
<p>Pour une bonne stabilité</p>	<p>La réduction des séparations des particules solides : Par la limitation de la teneur en granulats ; Par la réduction du diamètre maximal des granulats ; Par l'augmentation de la cohésion et de la viscosité : Un petit rapport eau/liant L'utilisation d'agent colloïdal (agent de viscosité) La minimisation du ressuage : En adoptant un petit dosage en eau, En adoptant un petit rapport eau/liant, En utilisant des fines à grande surface spécifique, Et en augmentant le dosage en agent de viscosité.</p>
<p>Pour un moindre risque de blocage</p>	<p>Accroître la cohésion pour réduire la ségrégation des granulats : Pour l'adoption d'un petit rapport eau/liant ; Par l'utilisation d'agent colloïdal ; Respecter une compatibilité entre l'espacement des armatures et les granulats (volume et diamètre maximal) : Par l'utilisation d'un petit volume de granulats ; En choisissant un petit diamètre maximal des granulats.</p>

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

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

Le comportement rhéologique d'un matériau (fig.IV-1) est dit viscoplastique si son écoulement ne se produit qu'au-delà d'une certaine valeur des contraintes appliquées, appelée seuil de cisaillement, τ_0 .

Le fluide est considéré comme *binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation : $\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$.

Avec τ la contrainte de cisaillement (Pa), τ_0 le seuil de cisaillement (Pa), η_p la viscosité plastique ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) et $\dot{\gamma}$ la vitesse de déformation (s^{-1}).

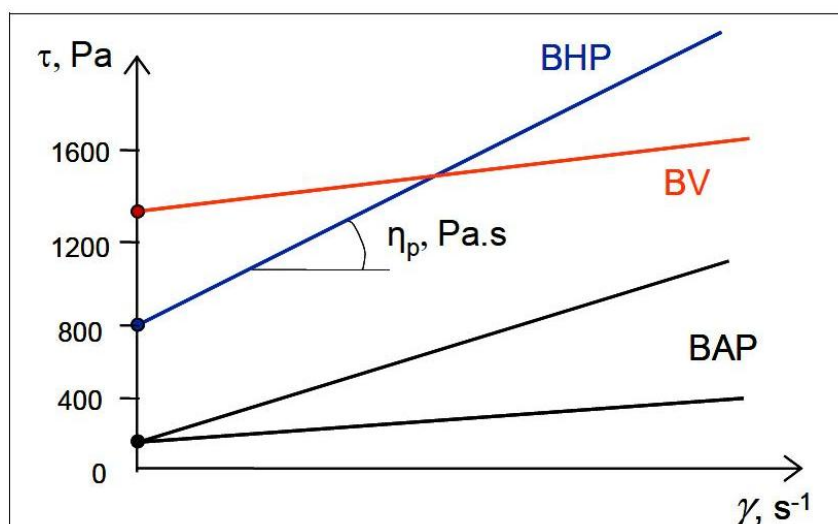


Fig. IV-1 – Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton [71].

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [49] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de Herschel-Bulkley dont l'équation de comportement est la suivante : $\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$

Où a : paramètre de viscosité

b : paramètre rhéologique.

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

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique), permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place, sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres. À ce jour, les principaux dispositifs expérimentaux utilisés pour des mesures sur béton frais sont :

- Le viscosimètre à plaque parallèle BML ;
- Le rhéomètre coaxial BTRHÉOM ;
- Le rhéomètre coaxial CEMAGREF-IMG ;
- Le rhéomètre coaxial RHÉOCAD (mis au point par la société CAD Instrumentation avec l'aide de M. Vernet, ingénieur au CTG).

Tous ces appareils mesurent le couple résistant du béton en fonction de la vitesse d'écoulement imposée (par mise en rotation de divers mobiles ou palettes). Ces deux données permettent ensuite d'obtenir, par différents calibrages, les grandeurs caractéristiques de l'écoulement du béton, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique.

Cependant, la présence de granulats de tailles variées dans le béton ne permet pas de définir un matériau type pour tous ces rhéomètres qui servirait de référence à toutes les mesures. Par conséquent, étant donné les caractéristiques inhérentes à chaque rhéomètre, les comparaisons de résultats d'un appareil à l'autre ne sont pas forcément évidentes.

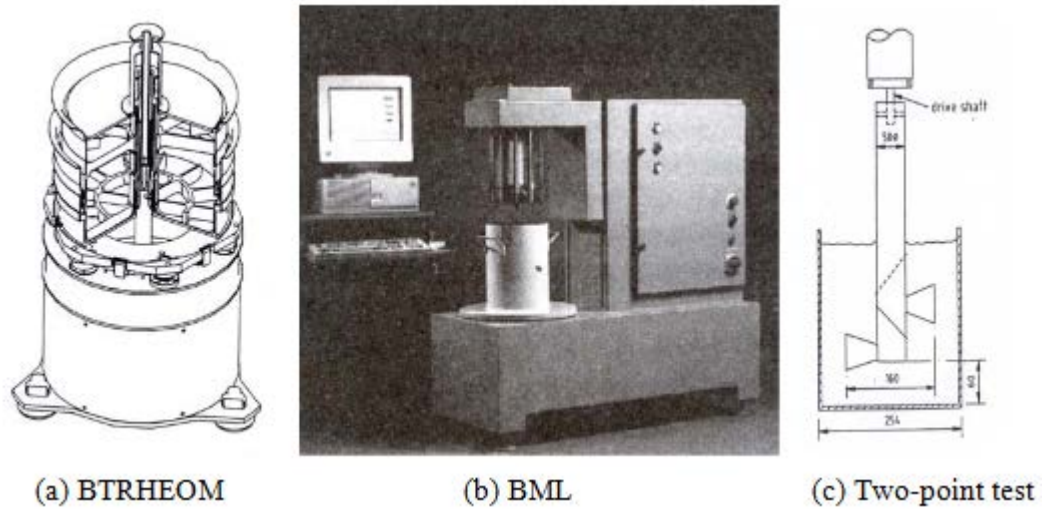


Fig. IV-2 – Rhéomètres développés pour les bétons.

IV.1.2. Essais de caractérisation des BETONS AUTOPLAÇANTS.

Capacité de remplissage.

Le béton autoplaçant doit pouvoir remplir les coffrages les plus densément armés, et ce, sans nécessiter d'intervention humaine pour aider à la mise en place. Cette caractéristique, nommée "capacité de remplissage", dépend de deux facteurs : la déformabilité et la stabilité [71].

En effet, le béton doit pouvoir se déformer, sans qu'il y ait séparation du mélange, pour contourner les nombreux obstacles que représente une armature très dense. Il doit également faire preuve d'une bonne stabilité, c'est-à-dire présenter très peu de ressuage et résister à la segmentation afin d'éviter le blocage de l'écoulement que l'accumulation de granulats vis-à-vis des barres d'armatures peut causer.

L'essai consiste à déverser 30 l de béton autoplaçant dans un contenant cubique dont le fond contient un grillage ayant un maillage de 30 mm d'ouverture. Une trappe empêche le béton de s'écouler avant le moment de l'essai. On applique ensuite une pression uniforme sur la surface du béton et on ouvre la trappe. Lorsque l'écoulement cesse, on mesure la quantité de béton ayant traversé le grillage.

Les essais visant à évaluer la capacité de remplissage ont généralement comme principe d'évaluer l'habileté du béton à passer à travers une série de barre d'armatures en mesurant la quantité de béton ayant franchi ces obstacles.

Essai de la boîte.

C'est un des premiers essais utilisés. Un échantillon de 30 litres de béton est placé dans une boîte dont le fond est constitué d'une grille et d'une trappe amovible (Figure I.19). Les dimensions de la boîte sont 30 cm par 30 cm et les barres, de 16 mm de diamètre, sont distantes de 50 mm (entre axes). Le volume de béton réussissant à passer le treillis donne une idée de la capacité de remplissage (Okamura et coll.). Pour un béton ayant une excellente capacité de remplissage, la quantité de béton traversant le treillis peut être aussi élevée que 95% de la masse totale de béton contenu dans la boîte. Figure IV.3 : Essai de la boîte (ou de la passoire). Cet essai a notamment permis d'observer les phénomènes de blocage par formation de voûtes dans les bétons très fluides.

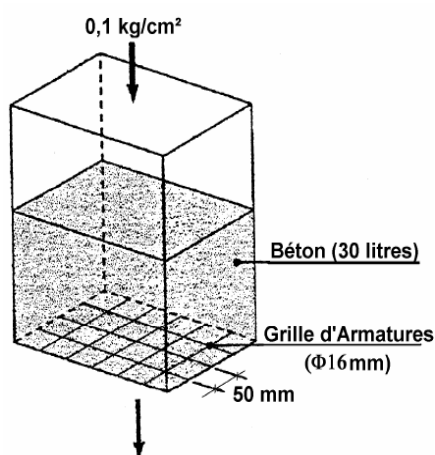


Fig. IV-3 – Essai de la boîte [72].

Essai de capacité de remplissage.

Cet essai ressemble au précédent, en étant cependant plus objectif et plus pratique. Il s'agit d'une boîte transparente de 500 mm de largeur par 300 mm de hauteur et de profondeur. On laisse couler le béton frais à travers un entonnoir, puis celui-ci doit passer à travers un réseau de barres d'armatures de 16 mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre. En calculant l'aire occupée par le béton par rapport à la surface totale de la boîte, on trouve un coefficient de remplissage défini comme étant :

$$F = A / (A + B)$$

Où **A** : aire occupée par le béton (mm²) ;

B : aire non occupée par le béton (mm²).

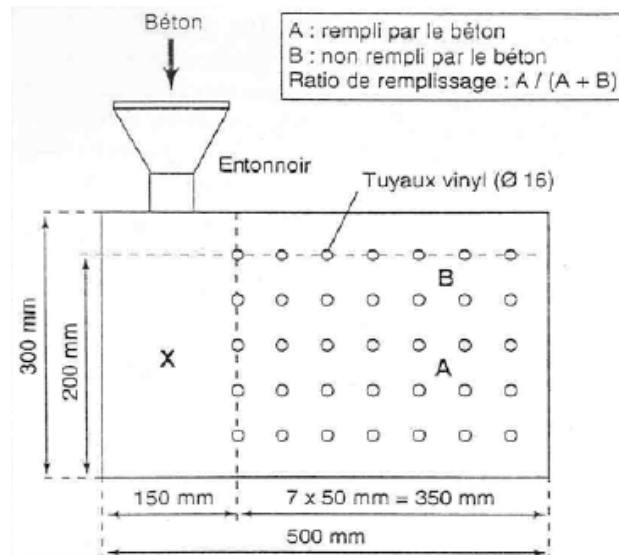


Fig. IV-4 – Essai de capacité de remplissage [73].

Essai du tube en U.

Le tube en U (figure IV-5) est composé de deux parties R1 et R2 séparées par une trappe. L'essai consiste à remplir la partie R1 puis à ouvrir la trappe et laisser le béton s'écouler librement. Après écoulement on mesure la hauteur de remplissage dans la partie R2, celle si doit être supérieure à 30cm pour un BAP.

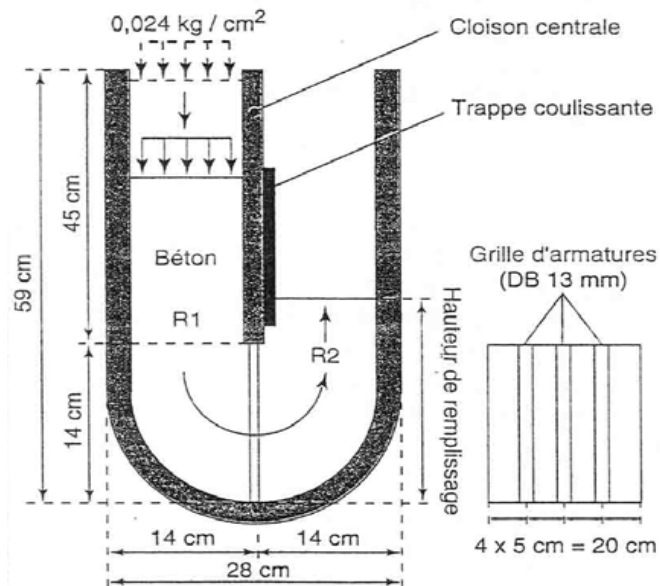


Fig. IV-5 – Essai du tube en U.

IV.1.3. Déformabilité.

La facilité du béton à s'écouler, car l'eau libre qui est définie comme étant l'eau non retenue, chimiquement ou physiquement, par les particules fines (ciment et ajouts minéraux) ou le sable, serait le principal facteur qui contrôle la déformabilité.

Essai d'étalement (slump flow).

L'essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure IV.6). Cependant, l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure, en plus, le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. L'essai au cône d'Abrams donne une indication sur le seuil de cisaillement du béton et sa capacité à s'autocompacter en milieu non confiné. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. En effet, l'essai au cône d'Abrams ne donne qu'une image partielle du comportement rhéologique du béton [73, 74].

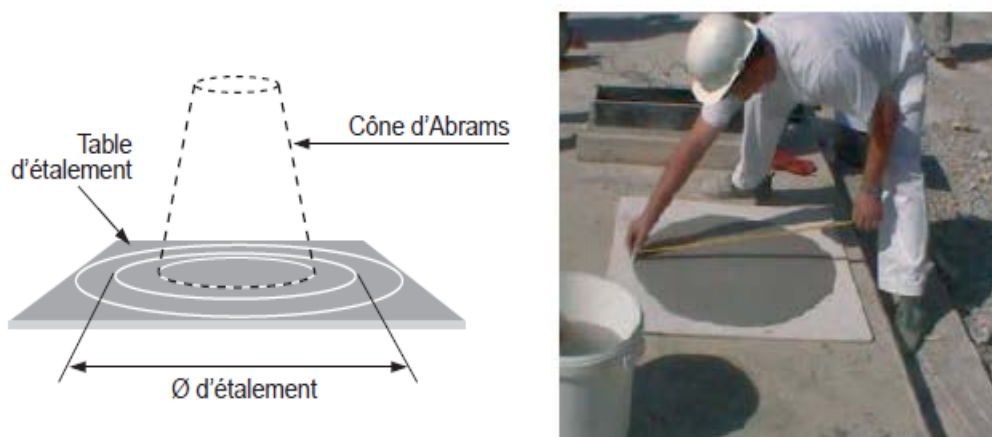


Fig. IV-6 – Mesure de l'étalement des BAP.

Dans les pays germanophones, on utilise plus volontiers la table DIN (ou table à secousse). Un cône, de dimensions différentes celles du cône d'Abrams, est démoulé sur une table et soumis à 15 chocs successifs. Son étalement fournit un moyen d'appréciation de la consistance.

Essai de la boîte en L.

Cet essai est destiné à tester la facilité de l'écoulement du matériau en milieu confiné. On remplit la partie verticale de la boîte en L de béton, on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 comme il est montré dans la figure IV-7.

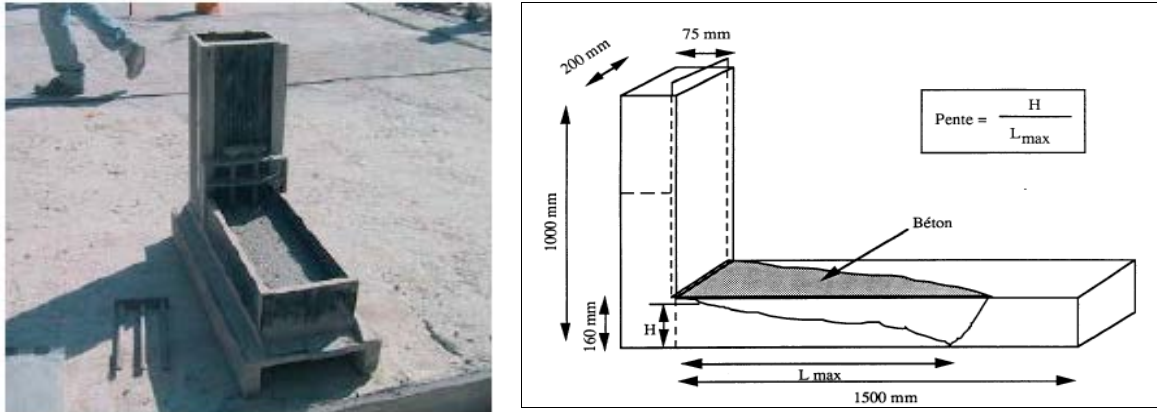


Fig. IV-7 – Essai de la boîte en L.

Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible. Selon les recommandations de L'AFGC (Association Française du Génie Civil), le taux de remplissage doit être supérieur à 0.8. Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage très dense (100 à 350 kg/m³) pour des ouvrages de génie civil avec un espace libre entre barres d'au moins 60 mm. Pour des applications moins ferrillées, il est possible d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer la teneur en granulat d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant d'autre part.

Essai de Viscosité.

La résistance à la ségrégation étant liée à la viscosité, il serait logique de chercher à mesurer la viscosité du béton. C'est donc en vain qu'on proposera des indicateurs rhéologiques (viscosité, seuil de cisaillement) cible pour les bétons autoplaçants puisque ceux-ci dépendent des matériaux et de l'utilisation projetée pour le béton. Selon Ozawa et coll. (1992) la déformabilité n'est pas directement liée aux indicateurs rhéologiques [71]. En effet, la contrainte de cisaillement interne du béton est liée à sa propre déformation. Les indicateurs rhéologiques, qui donnent la contrainte de cisaillement interne, ne peuvent donc donner la déformabilité du béton. Un article de Umehara et coll. (1994) portant sur les bétons légers autoplaçants donne tout de même des indicateurs rhéologiques cibles pour que le béton ait une bonne capacité de remplissage. Comparant le béton autoplaçant au béton à affaissement plus faible, il est mentionné que le béton autoplaçant doit avoir un seuil de cisaillement plus faible pour pouvoir s'écouler sous son propre poids et une viscosité plus élevée pour résister à la ségrégation dynamique et élastique [75].

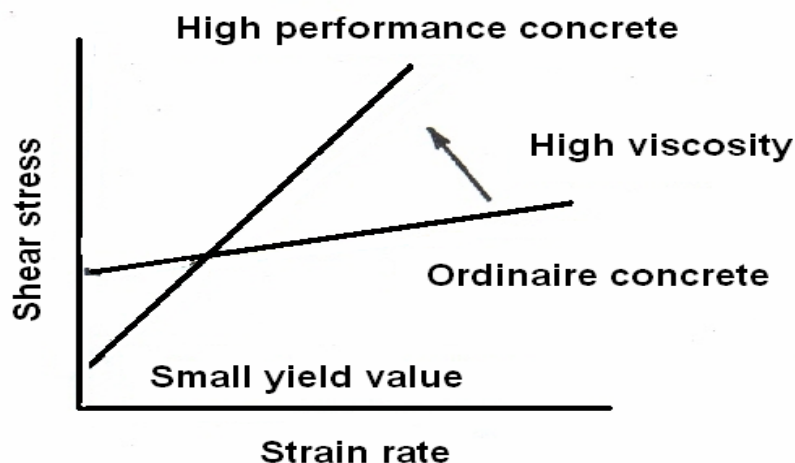


Fig. IV-8 – Rhéologie du Béton [75].

Il est donc suggère que le mortier ait un seuil de cisaillement inférieur à 65 MPa, afin qu'il puisse s'écouler sous son propre poids, et une viscosité plastique d'environ 1.8 Pa qu'il résiste bien à la ségrégation. Pour abaisser le seuil de cisaillement, il est mentionné qu'il faut augmenter la quantité d'eau libre dans le béton. Le seuil de cisaillement est relié à la déformabilité. Ces indicatifs ne sont valables que pour les bétons légers.

Selon Umehara et coll. (1994) le seuil de cisaillement de la pâte de ciment devrait être inférieur à 65 Pa pour que le béton autoplaçant puisse s'écouler sous son propre poids préconisent donc d'utiliser un viscosimètre pour déterminer si un mélange est bon ou pas [75].

IV.1.4. Stabilité ou ségrégation.

La ségrégation se définit comme une perte d'homogénéité du béton. Elle peut se produire lors d'un malaxage trop prolongé, en phase de transport, de mise en œuvre, voire même dans l'ouvrage après consolidation. La prévention de la ségrégation doit se conjuguer au niveau de la phase de formulation du matériau, et à celui de sa mise en œuvre. Pour les bétons autoplaçants, le contrôle de la ségrégabilité est au cœur du processus de formulation. A côté de l'essai de la boîte en L, il est nécessaire de pratiquer un essai destiné à vérifier la non-ségrégation statique du matériau, qui se manifesterait par une descente de la phase la plus grossière du matériau, accompagnée par une remontée du mortier.

La stabilité des BAP est déterminée par l'essai de l'entonnoir. Généralement, on peut distinguer deux types d'appareillage : les entonnoirs à section circulaire et ceux à section rectangulaire. L'essai est censé mesurer la résistance à la ségrégation du béton et donner un indice sur la déformabilité. Il simule l'écoulement restreint du béton à son passage à travers des zones confinées. Après le remplissage de l'entonnoir par le béton, on ouvre la porte de décharge au fond et on mesure le temps de vidange total. Le temps d'écoulement nécessaire pour qualifier un BAP dépend de la pente d'écoulement. Dans le cas de l'entonnoir de la figure, on recommande un temps d'écoulement inférieur à 6 secondes.

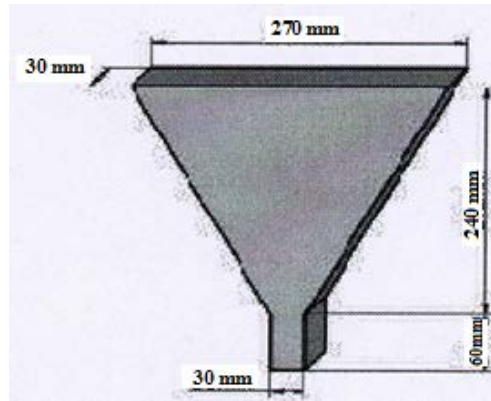


Fig. IV-9 – Essai de l'entonnoir [76, 77].

IV.1.5. Stabilité au tamis.

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 et 20 %.



Fig. IV-10 – Essai de stabilité au tamis.

IV.2. PROPRIETES DU BETON AUTOPLAÇANT A L'ETAT DURCI.

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion des granulats qui entrent dans leur composition [78, 79]. De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un matériau composite à deux phases, composé d'une matrice (la pâte durcie, et d'inclusions) et les granulats. Les propriétés du composite (module, fluage, retrait) sont alors fonction des caractéristiques élastiques de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait. Les BAP sont donc

susceptibles d'être plus déformables que les bétons traditionnels, à cause de la plus forte quantité de pâte.

Le rapport entre résistance en traction et résistance en compression des BAP est à priori peu différent des bétons traditionnels. Toutefois, il est conseillé, lorsque la résistance en traction présente une importance particulière, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation. L'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des bétons ordinaires. Dans certaines configurations (nappes supérieures des pièces épaisses, la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis du ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains bétons ordinaires et peut améliorer l'enrobage des armatures.

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

Les parements obtenus avec les BAP sont potentiellement meilleurs qu'avec des bétons ordinaires en particulier pour ce qui concerne les défauts liés à l'étanchéité des coffrages et à la vibration.

IV.2.1. Résistance mécanique.

De nombreux travaux ont montrés que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion de granulats qui entre dans leur composition [80, 81].

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases : la pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions. Les propriétés de ce mélange (résistance à la compression, résistance à la traction, retrait) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion et de leur retrait.

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance à la compression aux jeunes âges. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Gibbs 99 et Al ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [81].

Les résistances mécaniques d'un BAP sont comme pour la plus part des bétons, directement reliées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment. Elles dépendent aussi de la composition du liant et de la valeur du liant équivalent.

L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistance jusqu'à des BAP à haute performances : 95-100 MPa pour la résistance en compression à 28 jours. A résistance équivalente, l'évolution des résistances à la compression semble voisine pour les BAP et les bétons vibrés. À court terme (de un à quinze jours), l'évolution des résistances peut même s'avérer plus rapide pour les BAP en raison de l'utilisation fréquente de fillers calcaires connus pour avoir un effet accélérateur sur l'hydratation des silicates de calcium.

Aux très jeunes âges (jusqu'à un jour), les résistances des BAP peuvent être affectées lorsque ces bétons contiennent des quantités importantes de superplastifiant (un dosage trop élevé pouvant conduire à un retard de prise conséquent). Il est possible cependant d'atteindre des résistances mécaniques élevées au démoulage en optimisant le choix et le dosage en adjuvant notamment. Donc l'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [80]. Les particules fines du filler,

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

Différentes données ont été publiées [82, 83] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés et soutiennent les affirmations précédentes voir figure ci-dessous :

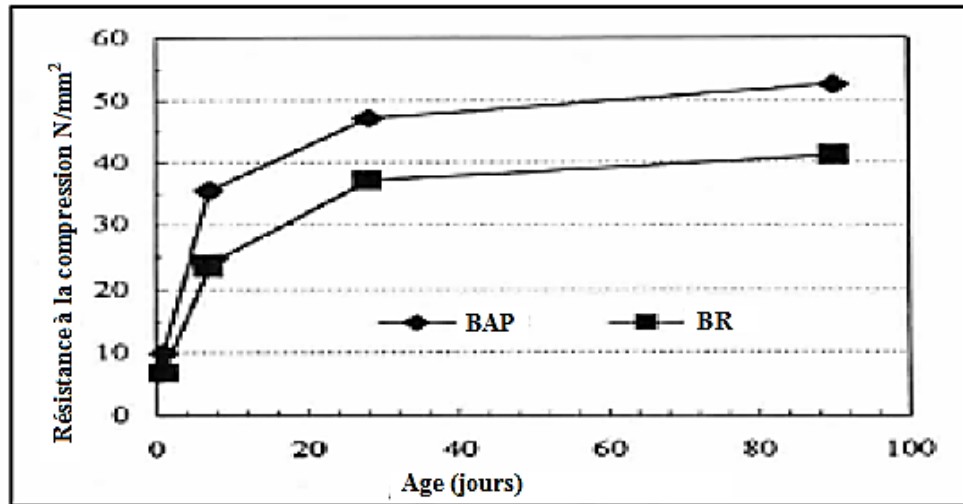


Fig. IV-11 – Évolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [82].

De plus, certains auteurs [84] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande. Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours.

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [85].

IV.2.2. Module d'élasticité statique en compression.

Dans la pratique, on cherche souvent à relier le module d'élasticité à la résistance à la compression, pour n'avoir à déterminer que l'une des deux propriétés. En général, on cherche à obtenir le module d'élasticité à partir de la résistance à la compression et non le contraire.

Différentes relations se trouvent dans la littérature. Celle de Pauw [85] propose une relation en racine carrée :

$$E = k f_c$$

où E = module d'élasticité du béton,

f_c = Résistance à la compression,

k = constante relative à la masse spécifique du béton.

Le module élastique est contrôlé fondamentalement par la qualité de la pâte (E/C) et ignore la quantité de celle-ci. En effet, de nombreuses variations de ce premier essai de modélisation ont été proposées [86]. De cette façon, le comité ACI 318-08, pour des bétons avec une masse spécifique entre 1440 kg/m³ à 2480 kg/m³, a établi la valeur de la constante k comme la densité du béton à la puissance 1.5, multipliée par 43 en unités SI. Cette puissance

pourrait être erronée, au vu du travail de Lydon et Balendran [87] où le module élastique est une fonction au carré de la densité des granulats.

Un autre modèle, celui du code CEB-FIB 1990, pour calculer le module élastique d'un béton de poids normal est obtenu avec une relation où apparaît la racine cubique et non carrée de la résistance à la compression :

$$E = 2.15 \times 10^4 \sqrt[3]{\frac{f_m}{10}}$$

Une fois de plus, dans cette équation la quantité de pâte n'apparaît pas, de manière explicite. Par contre, tous les modèles qui prédisent le module élastique utilisent en général la résistance à la compression comme son principal paramètre d'entrée. Donc, si la résistance à la compression est influencée par le volume de pâte, le volume de pâte pourra avoir un impact sur le module élastique [88].

IV.2.3. Retrait du béton.

On distingue le retrait à partir de l'état frais ou de l'état durci. La plupart des études sur ce phénomène traitent le second, qui est plus simple sur le plan expérimental puisqu'on attend que le matériau ait durci pour débiter les mesures de variations dimensionnelles. Si l'on admet en général que la force motrice du retrait vient des forces capillaires, que ce soit par évaporation ou autodessiccation, il est néanmoins nettement moins clair comment quantifier ce phénomène par rapport à la composition du matériau. Les modèles les plus fréquemment employés actuellement pour la prédiction du retrait à l'état durci du béton n'incluent pas le volume de pâte comme un paramètre de calcul.

Seuls les modèles de Bazant et Carriera [89] incluent le volume d'eau comme un paramètre sensible du phénomène. De même seul le modèle ACI 209R [90] inclut le contenu de ciment comme une variable qui a une incidence sur le résultat final malgré un impact faible sur la valeur du retrait.

Retrait de dessiccation.

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs (Hu, 1998) [91] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (figure IV.12). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé. Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires [92].

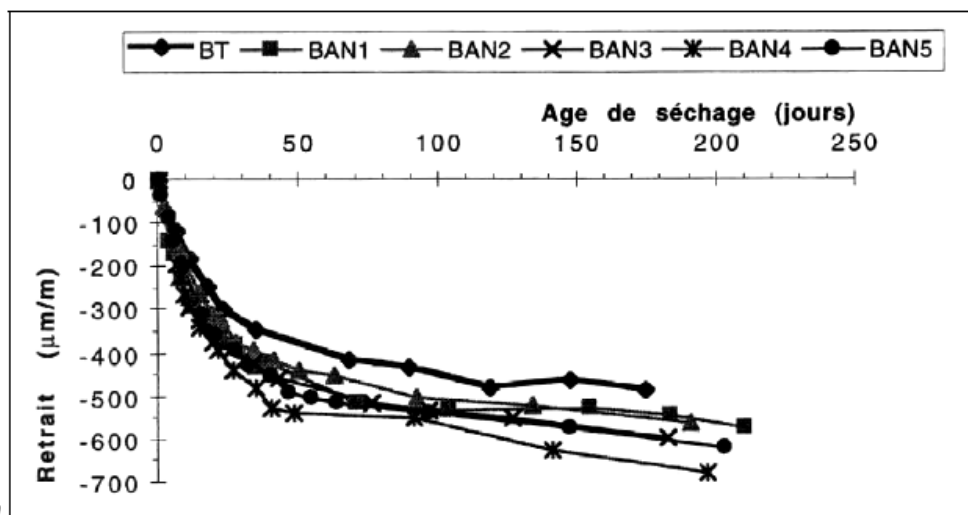


Fig. IV-12 – Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [92].

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [92, 93]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours). Enfin, d'autres auteurs (Sonebi, 1999) observent des retraits de séchage des BAP moins importants (figure IV.13) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent) [94]. Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après (Neville, 2000), augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage [95].

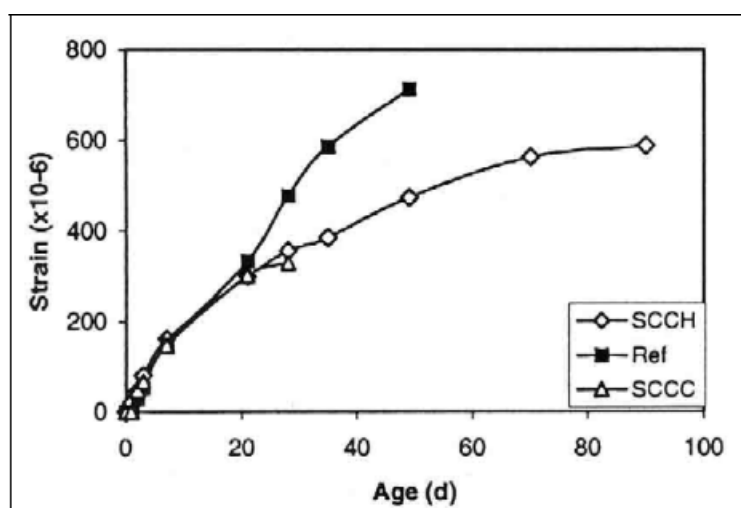


Fig. IV-13 – Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [95].

Retrait endogène.

En ce qui concerne le retrait endogène, les BAP présentent des déformations comparables à celles des bétons vibrés. En effet, même si certains auteurs (figure 1V-14) attribuent aux BAP un retrait endogène inférieur ou égal à celui des bétons vibrés, d'autres (figure 1V.15)

contestent cette tendance et soutiennent l'idée de comportements différés équivalents pour les deux types de béton.

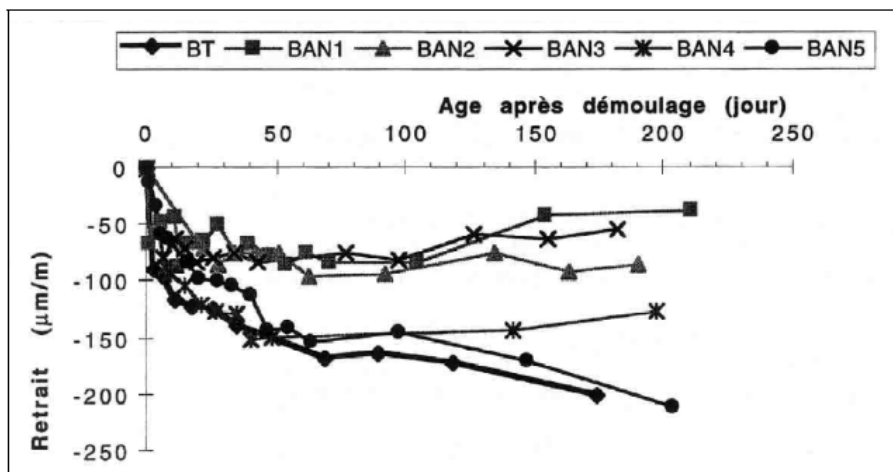


Fig. IV-14 – Comparaison des retraits endogènes d'un béton vibré et de cinq BAP [93].

L'évolution des réactions d'hydratation, à l'origine du retrait endogène, dépend de la quantité d'eau disponible dans le béton pour faire réagir les différents réactifs. Par conséquent, l'amplitude de ce retrait chimique va être directement liée au rapport E/C (autrement dit à la résistance mécanique). Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point. De plus, pour des bétons à faible rapport E/C, le retrait endogène des BAP est comparable à celui des bétons vibrés (figure IV.15).

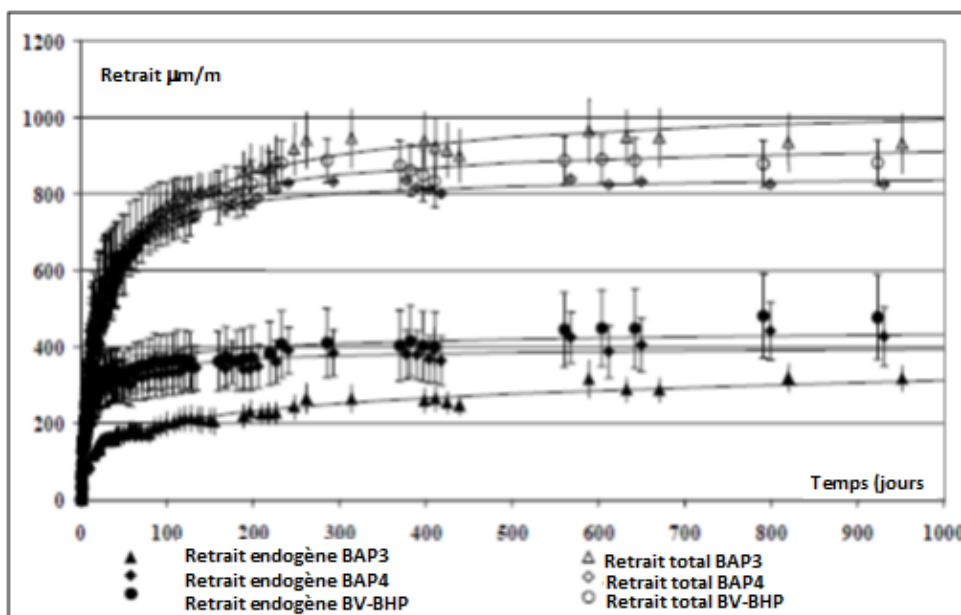


Fig. IV-15 – Retraits endogène et total d'un béton vibré et de deux BAP de résistance 60 MPa [96].

CONCLUSION.

Le béton autoplaçant est un matériau qui se confectionne en malaxant du gravier, du sable, de l'eau, d'ajout, d'adjuvant et du ciment .Il peut répondre à un grand nombre de spécifications : fluidité, isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité, incendie... Pour utiliser au mieux le béton autoplaçant, il faut bien connaître ses propriétés :

À l'état frais lorsqu'il se met en place sans vibration.

À l'état durci quand sa forme ne peut plus être modifiée, ses caractéristiques continuent à évoluer.

La propriété essentielle du béton autoplaçant frais est son ouvrabilité, c'est à dire son aptitude à remplir n'importe quel volume (coffrage, moule...) et à enrober convenablement les armatures. A la clé, une grande liberté de formes. Pour assurer une bonne ouvrabilité, il est indispensable de respecter les deux critères suivants :

1-La composition du béton autoplaçant et les moyens de sa mise en œuvre doivent être appropriés.

2-La teneur en eau doit être limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité.

Lorsque le béton autoplaçant a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.

Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.

CONCLUSION

Les BAP présentent un grand intérêt pour la réalisation des produits préfabriqués en béton et autres. Ils sont de plus en plus utilisés en usine pour réaliser de nombreux produits. Les compositions sont optimisées en fonction des applications visées, des contraintes techniques et économiques. Ces nouveaux matériaux sont appréhendés dans le cadre d'une démarche globale prenant en compte les gains potentiels sur l'ensemble du cycle de vie des produits préfabriqués : matières premières utilisées, énergie consommée au cours du processus de fabrication, réduction des nuisances, diminution de la pénibilité des tâches, durabilité, esthétique, utilisation dans l'ouvrage et réutilisation en fin du cycle de vie.

La banalisation de l'utilisation des BAP, et leur développement dans les prochaines années, suppose une parfaite synergie entre tous les acteurs de la construction, et nécessite une adaptation et une évolution des techniques de production du béton et de mise en œuvre, une préparation en amont des chantiers pour adapter son organisation et les techniques de construction (cadences, matériels, coffrages, etc.) Et une conception globale tirant le meilleur profit de l'adéquation entre le béton et l'ouvrage à chaque étape du chantier. Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usines de préfabrication, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution :

- Des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
- Des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers et en usines) ;
- De l'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines.

Ces nouveaux bétons sont générateurs d'économies globales sur les chantiers.

Une seule caractéristique résistait à l'amélioration globale du matériau, c'était celle de la résistance en traction. Il a alors été envisagé de rajouter d'autres éléments dans le composite multiphasique qu'est le béton autoplaçant, des éléments de la même échelle que les granulats : des fibres métalliques ou synthétiques dont le but devait être d'améliorer ce mauvais comportement du béton autoplaçant tendu.

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

La fonction principale des fibres dans le béton est de réduire l'ouverture et la propagation des fissures en état de service et de transformer le comportement fragile du béton en un comportement ductile (accroît la sécurité aux ELU).

L'incorporation des fibres dans le béton doit être particulièrement soignée, elle peut se faire :

- Au malaxage (en centrale à béton) ;
- Au moment du coulage (dans la toupie sur le chantier) ;

- Lors de la projection (béton projeté).

L'emploi de superplastifiant est recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.

PARTIE

EXPERIMENTALE

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODE DE FORMULATION

V.1. INTRODUCTION.

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche. La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituant sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX.

Les matériaux utilisés dans cette campagne expérimentale font partie d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

V.2.1. Ciment.

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ CEM II/A - 42,5) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) conforme à la norme algérienne NA 442, provenant de la cimenterie de M'sila du groupe LAFARGE.

Tableau V-1 – Composition chimique du ciment CEM II 42,5.

Élément	%
SiO ₂	16,80
Al ₂ O ₃	4,46
Fe ₂ O ₃	2,94
CaO	58,83
MgO	1,68
SO ₃	2,35
K ₂ O	0,60
Na ₂ O	0,03
P ₂ O ₅	0,15
TiO ₂	0,22
P.A.F	11,74
Total	100

Tableau V-2 – Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5.

Consistance normale	28,2 %
Début de prise (Dp)	155 mn
Fin de prise (Fp)	280 mn
Masse spécifique	3,02 g/cm ³
Surface spécifique (SSB)	3995 cm ² /g

Tableau V-3 – Composition minéralogique du ciment CEM II 42,5.

Minéraux	%
C ₂ S	12-18
C ₃ S	58-64
C ₃ A	6-8
C ₄ AF	10-12

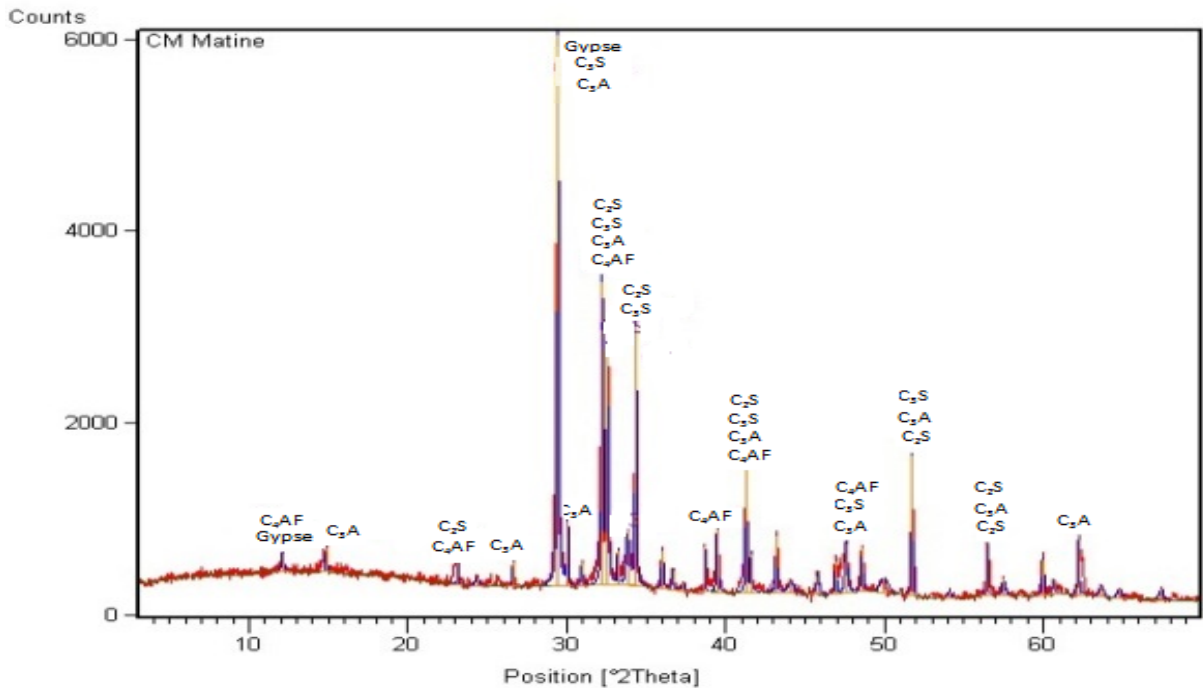


Fig. V-1 – Diffractogramme du ciment anhydre CEM II 42,5.

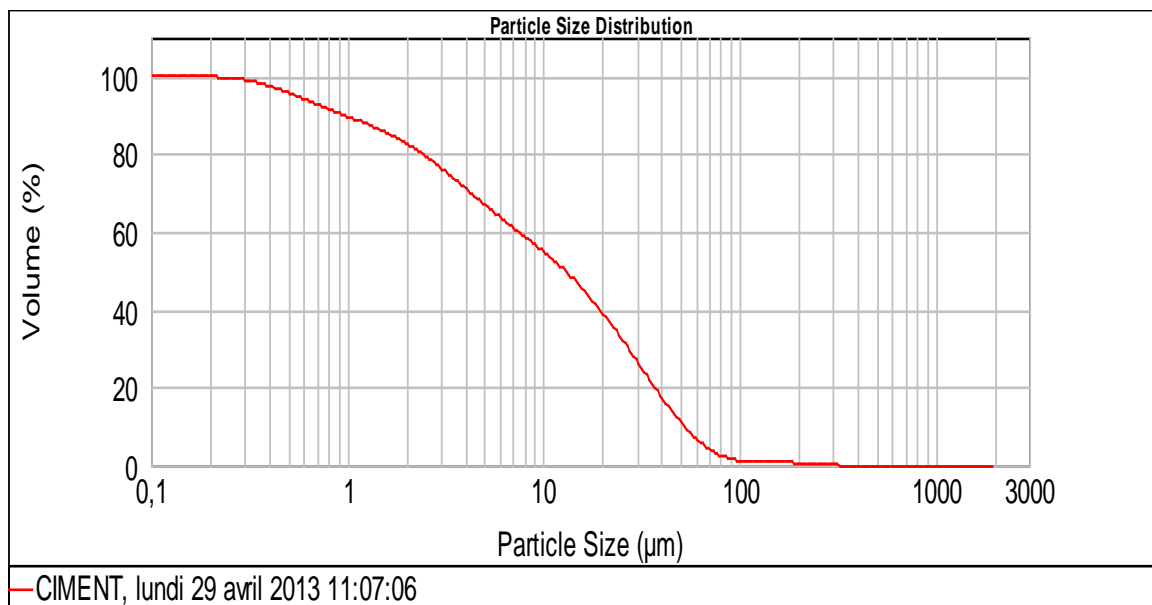


Fig. V-2 – Distribution granulométrique du ciment anhydre CEM II 42,5

Tableau V-4 – Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42,5.

Age	Résistance à la compression MPa (NA 234)
2 jours	23,42 ± 0,06
7 jours	38,51 ± 0,06
28 jours	46,23 ± 0,06

V.2.2. Ajouts cimentaires.

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm : La poudre de marbre, la fumée de silice, le métakaolin et le calcaire.

Poudre de marbre.

Le marbre est une roche métamorphique compacte commercialisée par l'entreprise nationale de marbre « ENAMARBRE » de la carrière de Fil-Fila située à 25 Km à l'est du centre-ville de SKIKDA. Extraite par abattage à l'exploitation, des moellons de dimension variant de (80-100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir une poudre finement broyée.

Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau V-5 – Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

Couleur	Blanche
Masse volumique	972,0 kg/m ³
Masse spécifique	2,68 g/cm ³
S.S.B	5500 cm ² /g

Tableau V-6 – Composition chimique de la poudre de marbre.

Élément	%
SiO ₂	0,48
Al ₂ O ₃	0,10
Fe ₂ O ₃	0,12
CaO	54,54
MgO	0,72
SO ₃	0,46
K ₂ O	0,01
Na ₂ O	0,01
P ₂ O ₅	0,02
TiO ₂	0,01
P.A.F	43,53
Total	100

Tableau V-7 – Composition minéralogique de la poudre de marbre.

.Minéraux présents	%
Quartz SiO ₂	1,5
Calcite CaCO ₃	95,5
Dolomite CaMg(CO ₃) ₂	03
Albite NaAlSi ₃ O ₈	-
Feldspaths K (Orthoclase) (K ₂ O 6SiO ₂ Al ₂ O ₃)	-
Illite 2K ₂ O Al ₂ O ₃ 24SiO ₂ 2H ₂ O	-
Minéraux ferrugineux + Autres	-
Total	100

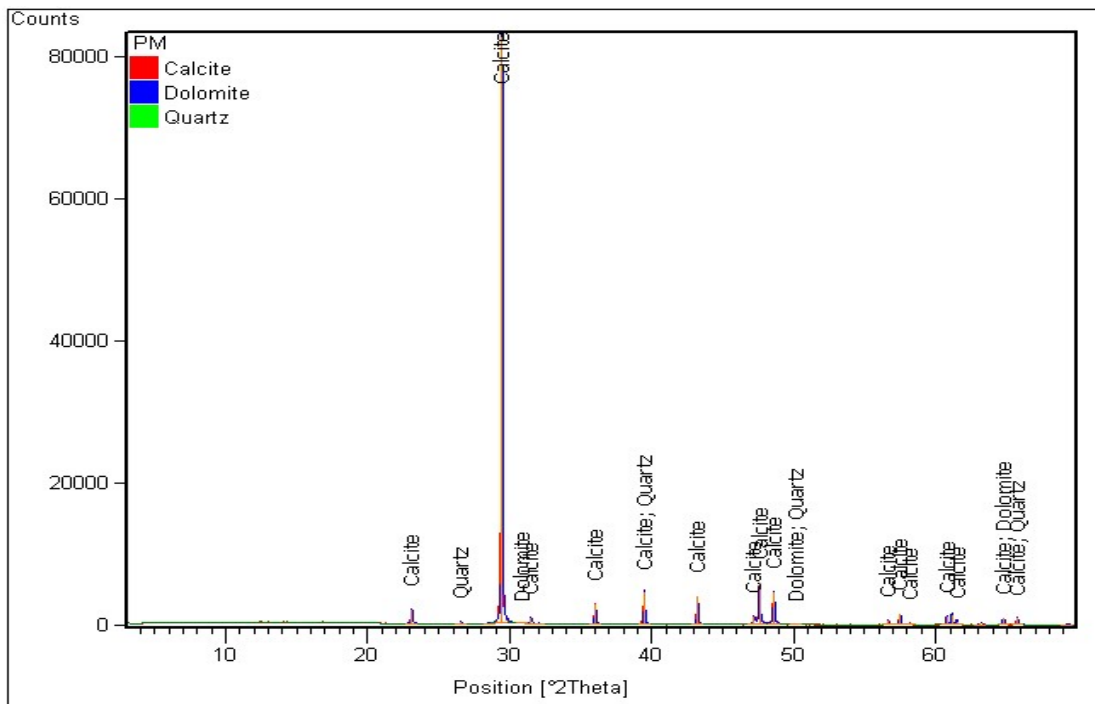


Fig. V-3 – Diffractogramme de la poudre de marbre.

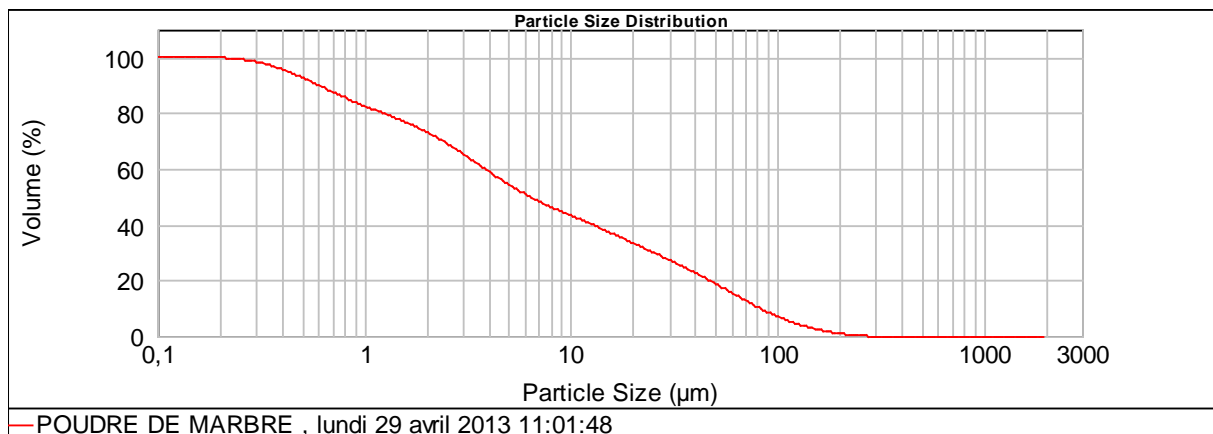


Fig. V-4 – Distribution granulométrique de la poudre de marbre

La fumée de silice utilisée est fournie par TEKNACHEM Algérie, antenne Oued Semar.

Tableau V-8 – Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

Couleur	Argent
Masse volumique	300 kg/ m ³
Masse spécifique	2,19 g/cm ³
S.S.B	220 000 cm ² /g

Tableau V-9 – Composition chimique de la fumée de silice.

Élément	%
SiO ₂	94,74
Al ₂ O ₃	0,47
Fe ₂ O ₃	1,25
CaO	0,30
MgO	0,54
SO ₃	0,05
K ₂ O	0,58
Na ₂ O	0,30
P ₂ O ₅	0,05
TiO ₂	0,01
P.A.F	1,71
Total	100

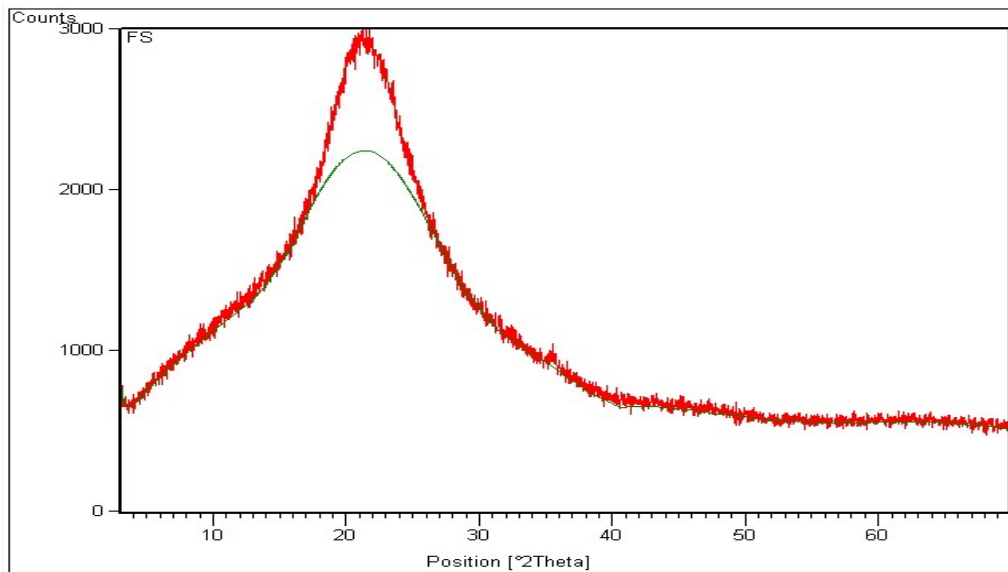


Fig. V-5 – Diffractogramme de la fumée de silice.

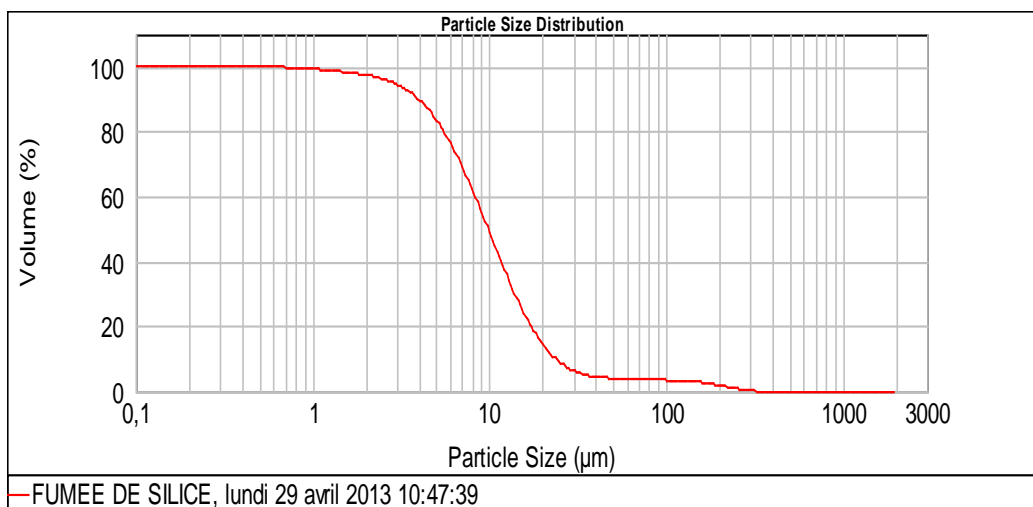


Fig. V-6 – Distribution granulométrique de la fumée de silice

Métakaolin.

Le métakaolin utilisé est sous forme de kaolin (brute) de la Faïencerie Algérienne de ZATCHI Rouïba Alger, provenant de Jijel. La cuisson du kaolin a été assurée au niveau de la Briqueterie et Tuilerie « BELHADI » à Boudouaou dans un four à une température de 850 C°, pendant un temps largement suffisant pour la transformation du kaolin en métakaolin, par la suite ce dernier a subi un broyage fin dans un broyeur à boulets au laboratoire de l'université de Boumerdès. Les caractéristiques du produit obtenu sont présentées comme suit :



Fig. V-7 – Métakaolin broyé.

Tableau V-10 – Caractéristiques physiques du métakaolin.

Couleur	Jaune
Masse volumique	905,6 kg/m ³
Masse spécifique	2,62 g/cm ³
S.S.B	6 600 cm ² /g

Tableau V-11 – Composition chimique du métakaolin.

Elément	%
SiO ₂	73,60
Al ₂ O ₃	16,36
Fe ₂ O ₃	1,07
CaO	0,39
MgO.	0,16
SO ₃	0,01
K ₂ O	4,56
Na ₂ O	3,22
P ₂ O ₅	0,13
TiO ₂	0,08
P.A.F	0,43
Total	100

Tableau V-12 – Composition minéralogique du métakaolin.

Minéraux présents	%
Quartz SiO ₂	42
Calcite CaCO ₃	-
Dolomite CaMg(CO ₃) ₂	01
Albite NaAlSi ₃ O ₈	27
Feldspaths K (Orthoclase) (K ₂ O 6SiO ₂ Al ₂ O ₃)	25
Illite 2K ₂ O Al ₂ O ₃ 24SiO ₂ 2H ₂ O	04
Minéraux ferrugineux + Autres	01
Total	100

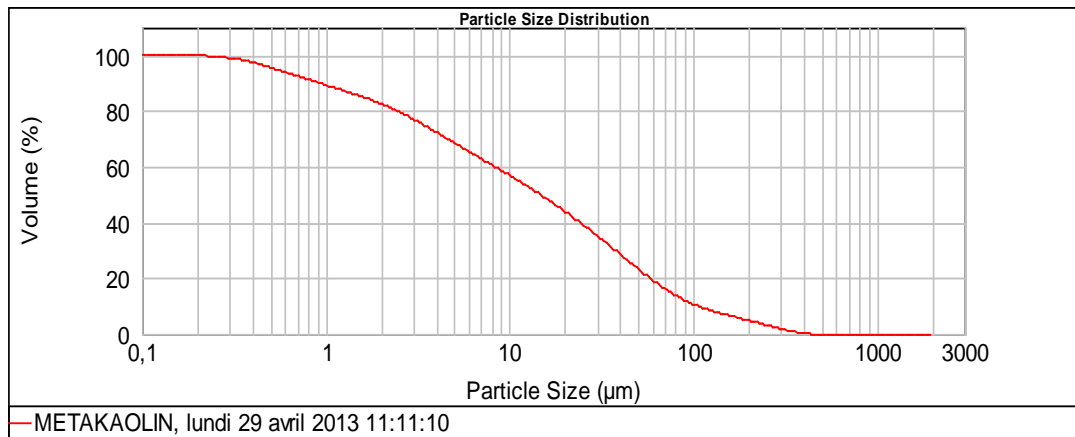


Fig. V-8 – Distribution granulométrique du métakaolin

Calcaire.

Les fines calcaires utilisées sont les fillers calcaires commercialisées par l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) sous le nom d'ALCAL F50, du gisement El-Khroub, constituées de calcaire d'origine biochimique néritique et caractérisées par une grande pureté chimique et une blancheur élevée [91].

Tableau V-13 – Composition chimique du calcaire.

Éléments	Teneur (%)
P.A.F	43,24
SiO ₂	0,7
AL ₂ O ₃	0,15
Fe ₂ O ₃	0,09
CaO	54,37
MgO	1,22
SO ₃	0,01
K ₂ O	0,01
Na ₂ O	0,13
Cl ⁻	0.001
Σ	100

Tableau V-14 – Caractéristiques physiques des fillers calcaire à différentes SSB.

Caractéristiques	Résultats
Masse spécifique (g/cm ³)	2,66
Surface spécifique (cm ² /g)	Variable

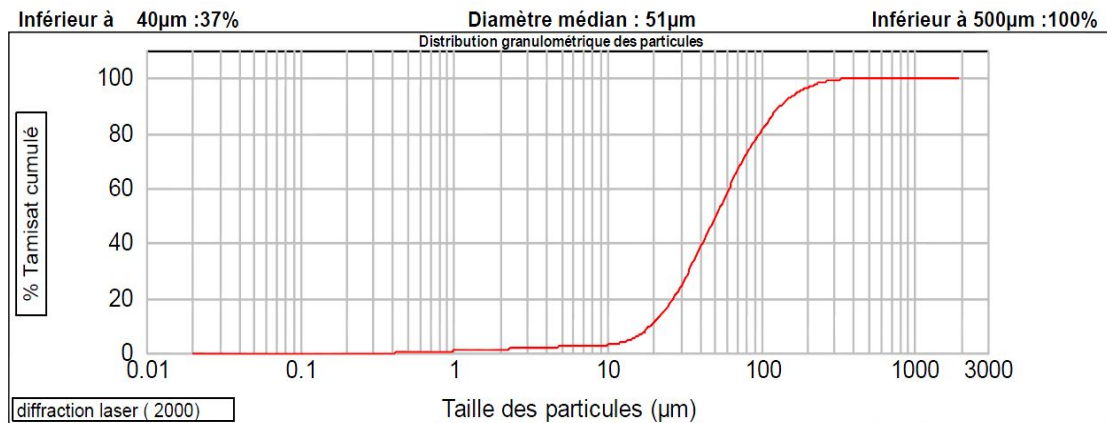


Fig. V-9 – Distribution granulométrique des fillers calcaire (ALCAL F50).

La figure suivante récapitule l'analyse granulométrique du ciment et les ajouts minéraux étudiés.

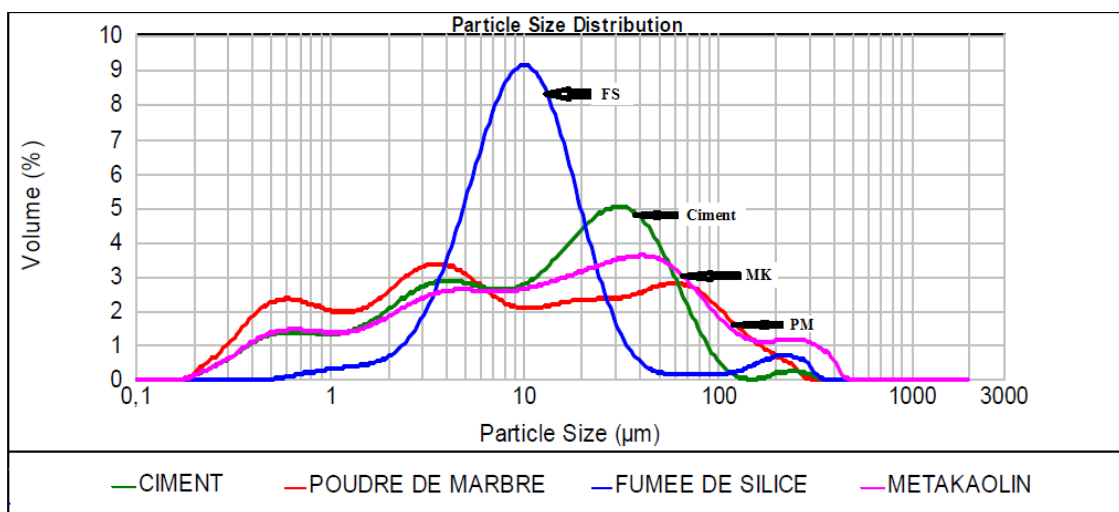


Fig. V-10 – Courbe récapitulative de l'analyse granulométrique du ciment et ses ajouts.

De la figure V-11 on constate que les particules de la fumée de silice présentent une finesse extrêmement élevée par rapport à celles de la poudre de marbre, du métakaolin et le ciment, ces derniers sont le produit d'un broyage non poussé par contre la fumée de silice est récupérée à partir des gaz dégagés sous forme de fumées.

V.2.3. Superplastifiant.

Les super plastifiants utilisés sont des hauts réducteurs d'eau commercialisée par l'entreprise GRANITEX sous le nom de MEDAFLOW 30 et 145. Conçu à base de poly carboxylates, ces adjuvants n'ont aucun effet retardateur.

Tableau V-15 – Caractéristiques du MEDAFLOW 30.

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité	1,07 ± 0,01
Extrait sec	30 %
Teneur en chlore	Inférieur à 1g/l
pH	Entre 6-6,5

Tableau V-16 – Caractéristiques de MEDAFLOW 145.

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
Densité	1,065 ± 0,015
Extrait sec	30 ± 1,5 %
Teneur en chlore	Inférieur à 1g/l
pH	Entre 5-6

V.2.4. Eau de gâchage.

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est une eau potable du réseau publique.

V.2.5. Nature des sables utilisés.

Deux types de sables ont été utilisés :

- Sable de dunes de BOUSAADA ;
- Sable de rivière de BAGHLIA.

L'analyse granulométrique traduit la distribution pondérale des grains par classe granulaire.

La classe granulaire définit deux dimensions d'ouverture de mailles carrées avec des conditions déterminées de tamis et de refus.

Sable de dunes (Boussaâda).

Tableau V-17 – Caractéristiques du sable de dunes.

M _s (g/cm ³)	M _v (kg/m ³)	ESV(%)	ESP(%)	M _f
2.51	1460	51%	48%	1,00

Tableau V-18 – Analyse granulométrique du sable de dunes (Boussaâda).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
1,25	00	00	00	100
0,63	00	00	00	100
0,315	20,7	20,7	2,2	97,8
0,16	857,1	877,8	93,3	6,7
0,08	49,7	927,5	98,6	1,4
Ft	0,6	928,1	98,7	1,4

Sable de rivière (Baghlia).

Tableau V-19 – Caractéristiques du sable de rivière.

Ms (g/cm ³)	Mv (kg/m ³)	ESV(%)	ESP(%)	Mf
2,54	1530	92%	90%	2,85

Tableau V-20 – Analyse granulométrique du sable de rivière (BAGHLIA).

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
5,00	9	9	0,9	99
4,00	43	52	5,2	95
2,00	252	304	30,4	70
1,00	186	490	49	51
0,5	161	651	65,1	35
0,20	174	825	82,5	18
0,125	61	886	88,6	11
0,063	63	949	94,9	5

On remarque que le sable de Baghlia a un module de finesse élevé (2.85). Par conséquent, une correction par le sable de dunes (Boussaâda) s'avère indispensable. Pour ce faire on a utilisé la méthode d'Abrams.

La correction du sable : le module de finesse désiré est $M_{fx}=2.30$.

$$S_1 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \times 100\% \rightarrow S_1 = \frac{2,3 - 1,00}{2,85 - 1,00} = 70,27\% \text{ de sable grossier}$$

$$S_2 = \frac{Mf_1 - Mf_x}{Mf_1 - Mf_2} \times 100\% \rightarrow S_2 = \frac{2,85 - 2,30}{2,85 - 1,00} = 29,73\% \text{ de sable de dunes}$$

V.2.6. Graviers.

Dans la phase bibliographique nous avons montré que pour éviter tous risques de blocage, le D_{max} est compris entre 10 et 20 mm, pour cette raison la taille maximale des gravillons est limitée à 15 mm. On a utilisé des gravillons provenant de Sétif :

- Fraction 3/8 ;
- Fraction 8/15.

Gravier 3/8.

Tableau V-21 – Caractéristiques physiques du gravier 3/8.

Mv (kg/m ³)	Ms (g/cm ³)	Los Angeles	Micro Deval	Propreté Superficielle (%)
1390	2,6	23,70	30,20	3,92

Tableau V-22 – Analyse granulométrique du gravier 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
10	3	3	0,2	100
8	147	150	9,4	91
6,3	448	598	37,4	63
5	565	1163	72,7	27
4	268	1431	89,4	11
3,15	88	1519	94,9	5
2	40	1559	97,4	3
1	15	1574	98,4	2
0,5	13	1587	99,2	1

Gravier 8/15.

Tableau V-23 – Caractéristiques physiques du gravier 8/15.

Mv (kg/m ³)	Ms (g/cm ³)	Los Angeles	Micro Deval	Propreté superficielle (%)	Coefficient d'aplatissement
1540	2,4	36,21	16,2	1,5	92,61

Tableau V-24 – Analyse granulométrique du gravier 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus Cumulés (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
20	0	0	0	100
16	196	196	6,5	93
12,5	380	576	19,2	81
10	471	1047	34,9	65
8	859	1906	63,5	36
6,3	756	2662	88,7	11
5	282	2944	98,1	2
4	32	2976	99,2	1

Tableau V-25 – Caractéristiques physiques du gravier 8/15.

Caractéristiques	Résultats	Unités
La masse spécifique	2,62	g/cm ³
Los Angeles	36,21	%
Micro Deval	19,04	%
Coeff d'aplatissement	95	%
Propreté superficielle	0,67	%

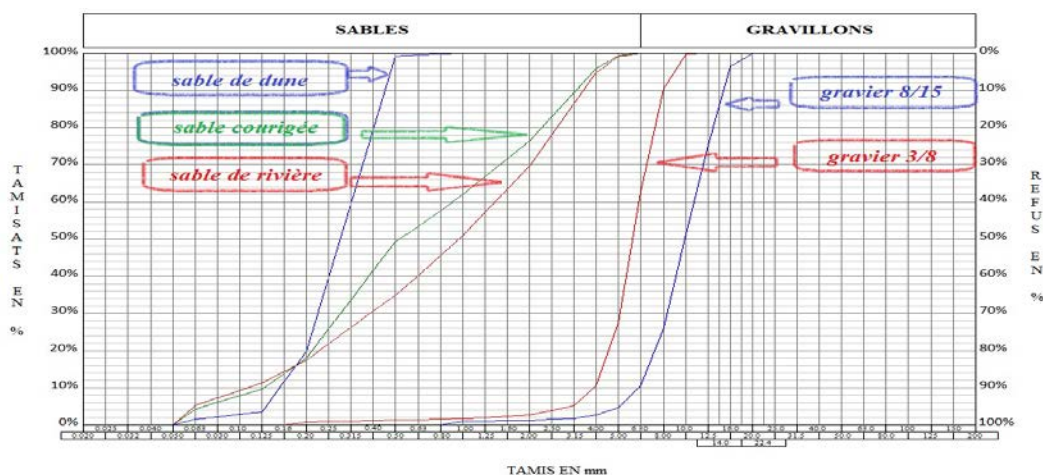


Fig. V-11 – Courbes granulométriques des granulats.

V.2.7. Fibres.

Les fibres utilisées dans ce travail sont de nature, dimensions et géométrie variées. Ces fibres sont incorporées lors du malaxage. Elles constituent un composant filiforme ayant un rapport longueur sur diamètre L/Φ , faible, de faible longueur (25 à 50 mm), d'origine métallique et synthétique. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres réparties dans la masse du béton permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Selon leur nature, elles ont un comportement contrainte-déformation très différent.

Fibres à crochets.

Tableau V-26 – Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets.

Caractéristiques	Résultats
forme	Crochets
Diamètre de la fibre	1,00 mm ($\pm 0,04$ mm)
Longueur de la fibre	Variables (50, 30) mm (+2/-3 mm)
Elancement (L/d)	25, 30, 50
Résistance à la traction typique	1 100 N/mm ²
Contenu/Sac	25 kg



Fig. V-12 – Fibres métalliques à crochets

Fibres métalliques à crochets encollées.

Les fibres SIKA METAL FIBRES RC80/50 BN. Ce sont des fibres à crochets encollées en plaquettes pour assurer une bonne répartition dans le béton.

Tableau V-27 – Caractéristiques techniques des fibres métalliques à crochets encollées.

Caractéristiques	Résultats
forme	Crochets
Diamètre de la fibre	0,55 mm ($\pm 0,04$ mm)
Longueur de la fibre	Variables (25, 30, 50) mm (+2/-3 mm)
Elancement (L/d)	25, 30, 50
Résistance à la traction typique	1 100 N/mm ²
Contenu/Sac	25 kg



Fig. V-13 –Fibres métalliques à crochets encollés.

Fibres métalliques ondulées.

Les fibres utilisées sont des fibres métalliques fabriquées localement (Ghardaïa), d’acier ondulées (rubans) de section rectangulaire, de masse volumique égale à 1,05 g/cm³ et de longueur respective de 30 mm et de largeur 2 mm.



Fig. V-14 – Fibres métalliques ondulées.

Fibres de verre résistantes aux alcalis (fibres Cem-Fil^R).

La fibre de verre est une fibre au filament continu, résistant aux alcalis ; développée et formulée pour avoir la rétention à haute résistance dans les environnements de ciment hydraulique, caractérisée par un point de ramollissement à 850⁰C et un point de fusion à 1350⁰C, ses performances ne sont donc pas altérées par les montées en température du béton.

Produites par les sociétés assermentées par la GRCA à savoir :(Nippon Electric Glass Et Sain –Gobain).



Fig. V-15 – Fibres de verre.

Fibres de polypropylène.

On utilise des fibres organiques (polypropylène) de société TECHNÀ.

Ce sont des fibres industrielles minces, de différents couleurs, chimiquement calmes et ne réagissent pas avec les composants de mélange du béton. La résistance des fibres de polypropylène à la tension est très forte, ainsi son élasticité. Le poids spécifique est faible et ces fibres n'absorbent pas de l'eau.

Tableau V-28 – Caractéristiques techniques des fibres de polypropylène.

Caractéristiques	Résultats
Densité	0,9
Diamètre de la fibre	28µm
Longueur de la fibre	12 mm
Elancement (L/d)	428
Résistance à la traction typique	320 à 400 MPa
Module d'élasticité	3500 à 3900 MPa



Fig. V-16 – Fibres de polypropylène.

V.3. FORMULATION DES BAP.

V.3.1. Méthode de formulation pratique des BAP.

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Dans l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 250 à 400 kg/m³. En complément la masse d'addition se situe entre 60 et 120 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

CONCLUSION.

Le programme expérimental retenu pour la confection des BAP nécessite dans une première étape de faire un choix des matériaux à utiliser, parmi ceux existants sur le marché tel que la poudre de marbre.

Ce choix se justifie d'une part par l'intérêt économique, du fait de la disponibilité abondante de cet ajout et de l'existence d'importants gisements à exploiter. D'autre part, cet ajout n'est pas encore exploité et connu tel que le calcaire. Ces types d'ajouts considérés comme inerte ont déjà été utilisés dans des études de formulation de bétons pour lesquelles les résultats obtenus sont considérés comme satisfaisants. Pour rappel, La poudre de marbre est un déchet résultant des opérations de sciage, façonnage et lustration de la pierre de marbre sont très fins et contiennent un taux appréciable de fines. Cette particularité est favorable à leur utilisation pour la fabrication des BAP. L'utilisation d'autres types d'ajout tel que la fumée de silice et le métakaolin à titre de comparaison ou de correction semble très intéressante.

L'utilisation de différents types de fibres avec des dimensions différentes peut potentiellement non seulement faire l'objet d'une recherche moins investiguée, mais peut aussi contribuer à l'amélioration des propriétés des BAP fibrés.

Les résultats du procédé d'identification des différents constituants courants entrant dans la formulation des BAP (sable, gravillons, ciment, ajouts, adjuvant, fibres, eau) répondent aux normes en vigueur.

La formulation des BAP ce fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception par calcul, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

VALORISATION DE L'AJOUT POUVRE DE MARBRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS

VI.1. INTRODUCTION.

La disponibilité et la diversité des matières premières (poudre de marbre, métakaolin, calcaire ...), présentant un faible coût par rapport à leur rentabilité, et du fait des performances mécaniques qu'elles offrent au béton ainsi qu'à sa durabilité, ont contribué à accroître l'utilisation de ces matériaux dans tous les domaines de la construction. Ce qui classe, par conséquent, le béton dans la première place des matériaux utilisés dans ce domaine et ce, à travers le monde.

Les maitres d'ouvrages, les maitres d'œuvres (ingénieurs et architectes) et autres intervenants dans l'acte de bâtir ont toujours tendance à la recherche d'un béton ayant :

- Une diminution du temps de réalisation lors de la mise en place du béton sur chantier ;
- Une mise en place aisée ;
- Un bon remplissage des coffrages ;
- Un parfait enrobage des armatures ;
- Une forte compacité.

Il s'avère que la vibration a toujours été le seul moyen en mesure de répondre à ces performances. Mais, devant la complexité croissante des structures, leur forme variée et leur forte concentration en armatures, les formulations des bétons devaient alors impérativement s'adapter.

La chimie des bétons et les additions minérales finement broyées ont fait qu'ils soient plus fluide avec une faible quantité d'eau de gâchage et ne nécessitant aucune vibration. la mise en place de ces bétons est ainsi améliorée par l'effet de gravité. C'est ainsi qu'est né « Le Béton Auto Plaçant – Le BAP »

Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée de la dernière génération d'adjuvants « super plastifiant haut réducteur d'eau ».

Béton auto plaçant (BAP), béton autonivelant (BAN) ou self compacting concrete SCC sont des appellations affiliées à cette fameuse révolution dans les bétons, dont on trouve d'une part des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires (BO) aux bétons à hautes performances (BHP) et d'autre part un volume élevé de pâte d'au aux quantités importantes des fines qui le compose.

À travers ce chapitre, nous nous intéressons à l'influence de l'ajout de poudre de marbre à différentes SSB (Surface Spécifique Blaine), sur les propriétés des BAP. Allons d'une SSB proche de celle de ciment, arrivons à une SSB extrême, passons par un cas intermédiaire, et on compare avec un BAP constitué d'ajout de filler calcaire et confectionné dans les mêmes conditions.

L'utilisation du déchet poudre de marbre est très nécessaire, d'une part pour éviter la pollution de la nature et d'autre part pour protéger les ressources naturelles. Actuellement, la poudre de marbre est l'une des additions minérales les plus utilisées dans la production du

béton dans le monde entier notamment en Turquie. Ce pays est très riche en marbre, il possède 700 carrières, 250 types de marbre et des réserves qui représentent 40% des réserves mondiales [97, 98].

Peu des travaux traitant l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre (PM) sur les bétons ont été publiés. Topçu et al. [99] ont étudié l'effet des PM sur les propriétés des BAP. Ces auteurs ont trouvé qu'une teneur en PM de 200 (kg /m³) est appropriée pour améliorer les propriétés des BAP à l'état frais et durci. Guneyisi et al. [100] ont montré que l'introduction de PM dans les mortiers autoplaçants par substitution partielle au ciment conduit vers l'augmentation du temps d'écoulement T_v et le temps du début et de fin de prise, tandis qu'elle diminue la résistance à la compression et la vitesse de propagation d'ondes. Ergun [101] a rapporté que le remplacement de 5% du ciment par de PM améliore la résistance à la compression des bétons conventionnels en raison de sa grande finesse (5960 g/cm²). Aruntas et al. [102] ont étudié la possibilité de produire des ciments composés contenant des déchets de marbre. Ces auteurs ont rapporté qu'il est possible de réduire le coût de production du ciment en utilisant 10% des déchets de marbre.

En résumé, l'utilisation des additions minérales est très bénéfique tant au niveau environnemental, technologique qu'économique. Néanmoins, certaines additions ont un effet négatif lorsqu'elles sont mélangées avec le ciment seul (mélange binaire), c'est le cas des fillers calcaires qui diminuent les résistances à la compression à long terme. Pour atténuer ce défaut, il est possible d'utiliser des mélanges ternaires, voire quaternaire de poudre par exemple : ciment Portland + métakaolin + fumée de silice (cité par A. Khelkhal) [103].

VI.2. PRINCIPES DE FORMULATION.

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams.

Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

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/m³ ;
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme NF EN 206-1, soit en général de 300 à 400 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 60 et 200 kg/m³ ;
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la

méthode Dreux - Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins.

Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle : 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. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP.

Pour la formulation des bétons autoplaçants, le dosage en eau ne s'exprime plus par le rapport E/C mais par le rapport E/L, L étant le liant hydraulique.

$$L = C + kA$$

Où C = dosage en ciment

A = dosage en additions (calcaires en général)

et k = indice (ou coefficient) d'activité hydraulique des additions.

Beaucoup de recherches ont été faites sur l'optimisation et le développement de formulations de béton autoplaçant, l'objectif principal de ces recherches est l'amélioration des performances du béton à l'état frais et durci.

Afin d'étudier l'effet de la finesse, le superplastifiant et le pourcentage d'ajout, une série de 18 compositions ont été préparées. Ces dernières présentent un rapport E/C constant, E/L variable ou le totale des fines est de 460, 480 et 520 kg/m³. La finesse de l'ajout varie de 3000, 7000 et 9000 (SSB) et pour le superplastifiant on a pris deux limites 1.5 et 1.75% de la masse du ciment.

Pour calculer les proportions des constituants pour un mètre cube, on fixe les rapports suivants :

- G/S de 0.9 à 1 pour augmenter la quantité de sable, celle-ci permet d'assurer une meilleure stabilité et une quantité suffisante de mortier ;
- Le rapport E/C ne dépassant pas les 0,4, le dosage en ciment étant constant ;
- Le volume d'air occlus (A_o) est de l'ordre de 5% ;

Dans 1m³ de béton, on a les constituants suivants :

$$G + S + C + E + A + SP = 1000 \text{ l}$$

Avec:

$$A = 5 \text{ l/m}^3$$

$$E/C = 0,4 \text{ avec } C = 400 \text{ kg /m}^3 \text{ On a donc } E = 157 \text{ l/m}^3$$

Le rapport étant fixé à : G/S = 1

On peut calculer les volumes G et S :

Pour les deux fractions du gravier on a choisi d'utiliser 50% de 8/15 et 50% du 3/8.

Les différentes compositions sont récapitulées dans le tableau VI-1.

Tableau VI-1 – Différentes compositions en Kg / m³ de béton.

	Ciment	Ajout	Eau	E /L	Finesse de P M	Sable de rivière	Sable de dune	G 3 /8	G 8 /15	Super plastifiant
BAPT	400	0	132	0,33	/	680	194	449	414	6
BAP1	400	60	152	0,33	3000	658	188	434	401	6
BAP 2	400	60	152	0,33	7000	658	188	434	401	6
BAP 3	400	60	152	0,33	9000	658	188	434	401	6
BAP 4	400	60	152	0,33	3000	658	188	434	401	7
BAP 5	400	60	152	0,33	7000	658	188	434	401	7
BAP 6	400	60	152	0,33	9000	658	188	434	401	7
BAP 7	400	80	158,4	0,33	3000	651	186	429	396	6
BAP 8	400	80	158,4	0,33	7000	651	186	429	396	6
BAP 9	400	80	158,4	0,33	9000	651	186	429	396	6
BAP 10	400	80	158,4	0,33	3000	651	186	429	396	7
BAP 11	400	80	158,4	0,33	7000	651	186	429	396	7
BAP 12	400	80	158,4	0,33	9000	651	186	429	396	7
BAP 13	400	120	172	0,33	3000	636	182	420	387	6
BAP 14	400	120	172	0,33	7000	636	182	420	387	6
BAP 15	400	120	172	0,33	9000	636	182	420	387	6
BAP 16	400	120	172	0,33	3000	636	182	420	387	7
BAP 17	400	120	172	0,33	7000	636	182	420	387	7
BAP 18	400	120	172	0,33	9000	636	182	420	387	7

VI.3. CARACTERISATION GENERALE DES BETONS A L'ETAT FRAIS ET DURCI.

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 recommandés par l'AFGC [AFGC 00] : affaissement/étalement au cône, écoulement à la boîte en L et stabilité au tamis.

Les propriétés à l'état frais de chacune des compositions et celles relevées une fois les bétons durcis à l'âge de 56 jours sont données dans le tableau IV-2.

Tableau VI-2 – Propriétés rhéologiques et mécaniques des différentes compositions.

	Masse volumique (kg/m ³)	Étalement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boîte en L	Résistance à la traction (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	Vitesse de propagation de l'onde (m/s)
BAPT	2305	61	12,32	0,76	4,88	41	4298
BAP1	2312	648	4,28	0,86	4,32	34	4311
BAP 2	2376	663	6,3	0,84	4,15	38	4349
BAP 3	2385	655	6,64	0,83	4,28	39	4353
BAP 4	2347	703	4,53	0,92	4,27	38	4378
BAP 5	2404	682	6,23	0,87	4,21	42	4383
BAP 6	2408	697	6,32	0,86	4,15	41	4388
BAP 7	2321	647	4,44	0,89	4,53	34	4332
BAP 8	2387	671	6,42	0,85	3,9	38	4357
BAP 9	2390	657	6,94	0,84	3,92	40	2398
BAP 10	2362	676	4,35	0,93	4,77	36	4369
BAP 11	2412	691	6,38	0,88	4,43	41	4427
BAP 12	2422	670	6,63	0,89	4,47	39	4436
BAP 13	2362	633	4,2	0,91	4,2	37	4327
BAP 14	2443	652	6,68	0,88	4,4	43	4392
BAP 15	2462	648	6,90	0,89	4,72	44	4398
BAP 16	2400	685	4,32	0,95	5,30	49	4371
BAP 17	2465	671	6,4	0,92	5,56	54	4465
BAP 18	2475	650	6,71	0,91	5,90	55	4468

Les résultats du béton autoplaçant témoin (sans fillers) sont traités à part et on s'est limité aux résultats à l'état frais.



Fig. VI-1 – Essai d'étalement du béton témoin.

Fig. VI-2 – Essai de la boîte en L du béton témoin

Selon les recommandations de l'AFGC un béton autoplaçant devrait présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60 cm, un rapport à la boîte en L supérieur ou égal à 0,8 et une stabilité au tamis inférieure à 15%. Quand la boîte en L est jugée critique et l'essai d'étalement a présenté une ségrégation au centre de la galette donc il est nécessaire de

procéder à l'introduction des fillers. D'où cette composition est rejeté parce qu'elle n'accompli pas les exigences de AFGC.

En second lieu, il faut remarquer que tous les bétons étudiés avec fillers ont présenté des étalements supérieurs à 60 cm, une stabilité au tamis inférieure à 15% et des rapports à la boîte en L supérieurs à 0,8. Ce qui permet de conclure que l'ensemble de ces bétons présente une fluidité acceptable et ne présente pas de risque de blocage.

VI.3.1. Masse volumique.

L'effet de la poudre de marbre, la finesse et le superplastifiant sur la masse volumique est présenté sur la figure VI-3. D'après cette figure on remarque que la poudre de marbre qui est un filler, intervient par sa finesse et s'insère dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité ; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique. Cette dernière augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, sa finesse ainsi que le taux de superplastifiant. On peut dire qu'il y a une proportionnalité entre la masse volumique et ces trois paramètres, cette proportionnalité peut être expliquée par l'effet de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la fermeté du béton, donc on peut prouver que l'effet granulaire, conditionné par une finesse de mouture très élevée explique ce phénomène et bien sûr par l'intermédiaire du superplastifiant qui assure une meilleure mobilité.

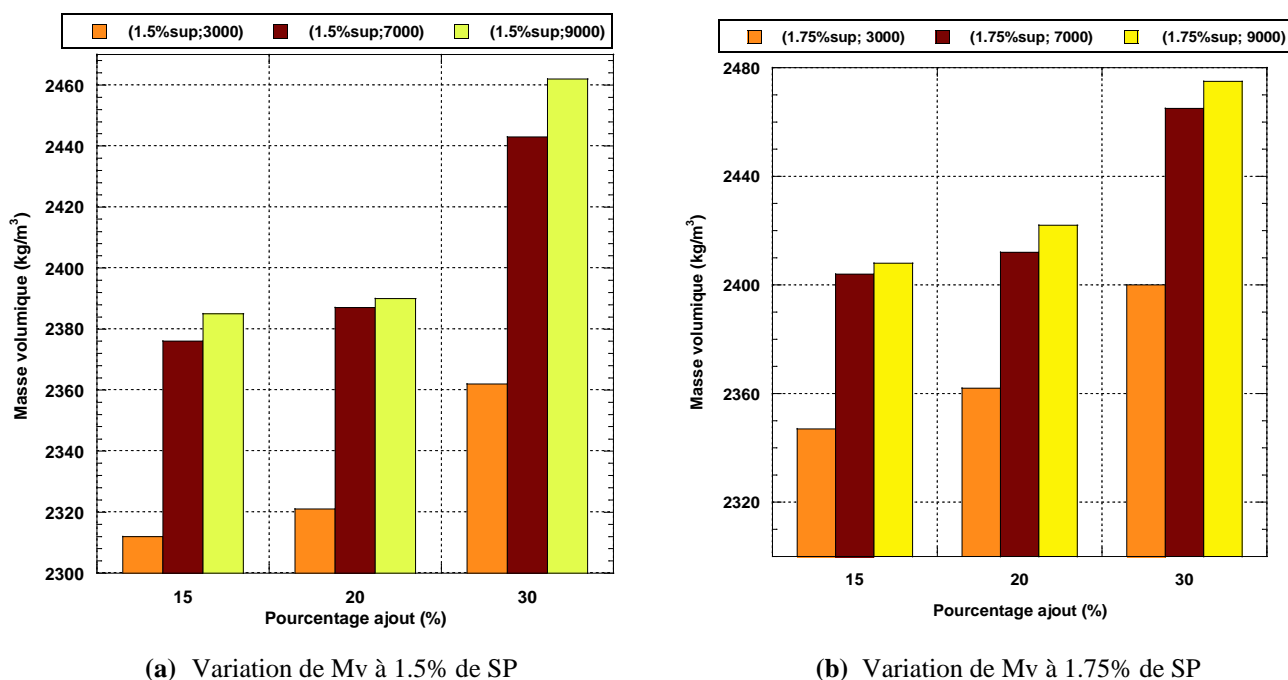
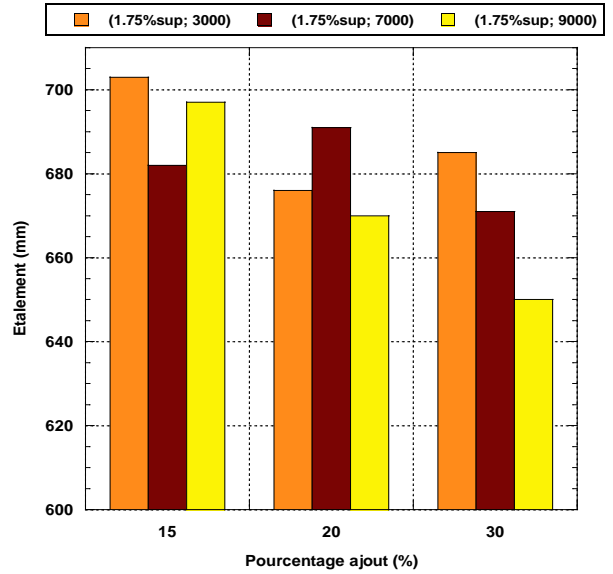
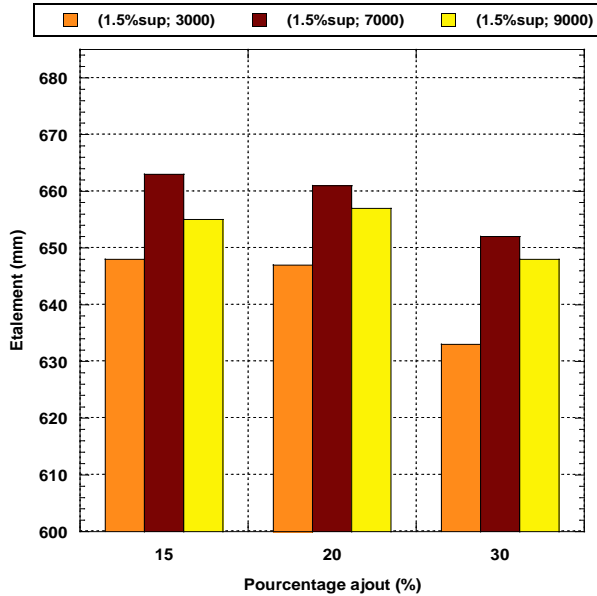


Fig. VI-3 – Variation de la masse volumique des BAP en fonction de la finesse, % d'ajout et % du superplastifiant.

VI.3.2. Étalement.

Nous pouvons constater que l'ensemble des bétons autoplaçants respectent le critère d'étalement. L'étalement spécifié est respectivement compris entre 633 mm (BAP 13) et 703 mm (BAP 4). L'étalement augmente avec l'augmentation du % de superplastifiant, en tenant compte de l'effet des fines qui s'insèrent dans les vides et libèrent l'eau emprisonnées dans les vides, ces derniers améliorent l'ouvrabilité de la matrice. Pour toutes les compositions de

BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était absente ou très faible (de 0.5 à 1 mm) suite à la bonne répartition des granulats et l'hydratation du ciment au jeune âge. 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.



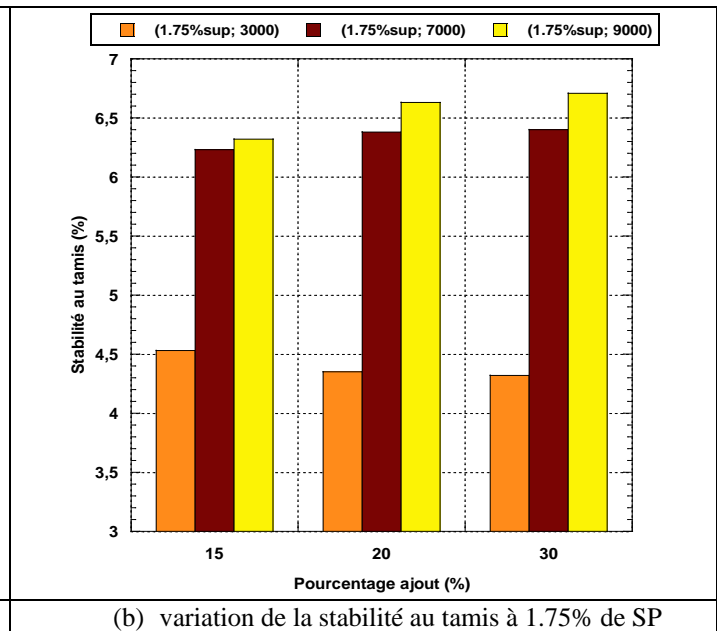
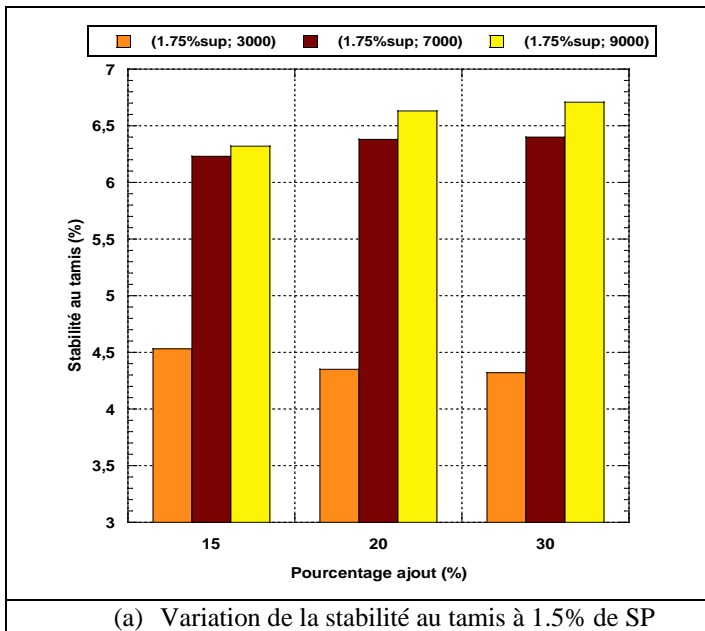
(a) variation de l'étalement à 1.5% de SP

(b) variation de l'étalement à 1.75% de SP

Fig. VI-4 – Évolution de l'étalement en (mm).

VI.3.3. Résistance à la ségrégation statique.

Pour la ségrégation statique ou stabilité au tamis, les BAP présentent des taux de ségrégation inférieurs à 15%, synonyme d'une stabilité correcte. L'augmentation du taux d'ajout et de finesse à un effet néfaste sur la stabilité au tamis, néanmoins le superplastifiant qui n'a pas une influence directe sur la stabilité statique.



(a) Variation de la stabilité au tamis à 1.5% de SP

(b) variation de la stabilité au tamis à 1.75% de SP

Fig. VI-5 – Variation de la ségrégation statique en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.

VI.3.4. Résistance à la ségrégation dynamique.

Pour la ségrégation dynamique caractérisée par l'essai L-Box, les résultats représentés sur la figure VI-6 sont conformes à ce que l'on peut attendre d'un béton auto-plaçant. 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 puisque tous les BAP présentent des taux de remplissage supérieurs à 0,80. Les BAP avec un superplastifiant élevé s'écoulent mieux que les BAP avec 1.5% de superplastifiant.

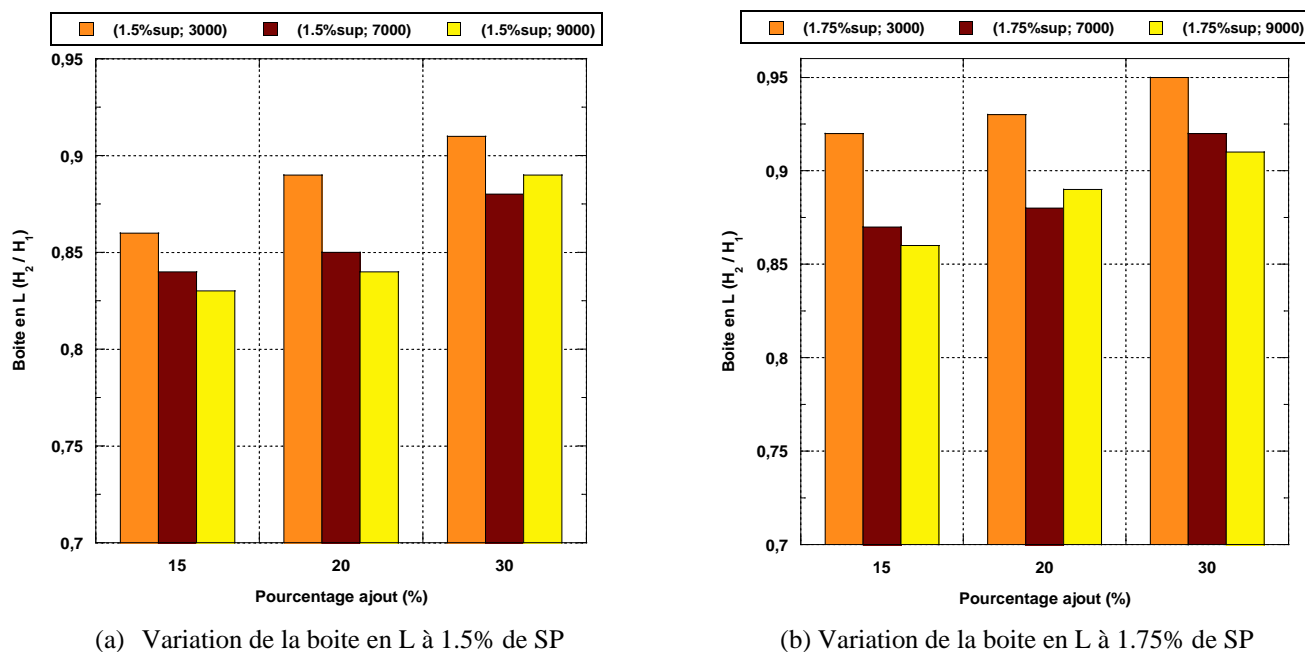


Fig. VI-6 – Variation du taux de remplissage H_2/H_1 .

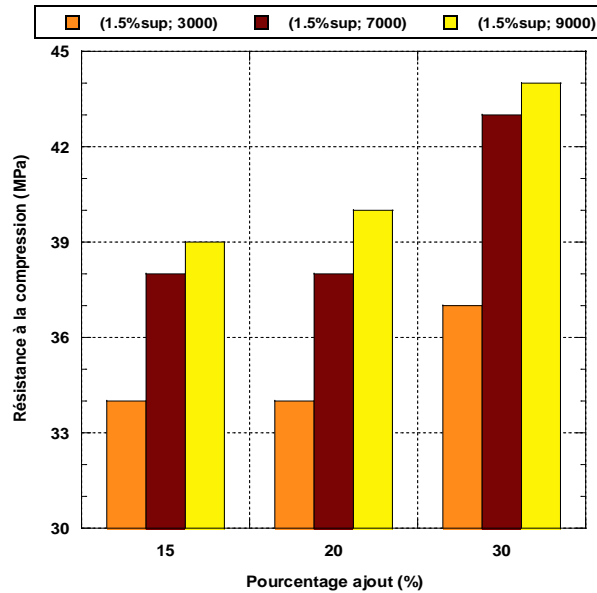
VI.3.5. Évolutions de la résistance à la compression des éprouvettes de béton durci.

D'après les résultats obtenus, on note une augmentation de la résistance en fonction du temps pour l'ensemble des compositions. Ces résultats expliquent l'hydratation du C_3S en présence du $CaCO_3$ de la poudre de marbre ce qui produit des hydrates de carbo-silicate de calcium qui affecte de bonnes performances mécaniques. Selon J BARON et J.P. Ollivier [104], il existe des forces de type chimique qui s'ajoutent à celles de Van der Waals pour assurer la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats calcaires. Concernant l'effet de la finesse et le % d'ajout on constate qu'ils ont un effet positif sur la résistance à la compression. Cette augmentation de la résistance est due à la compacité élevée des compositions à des SSB élevées (la composition optimale est 30% d'ajout avec une SSB de 9000 et 1.75 % de superplastifiant).

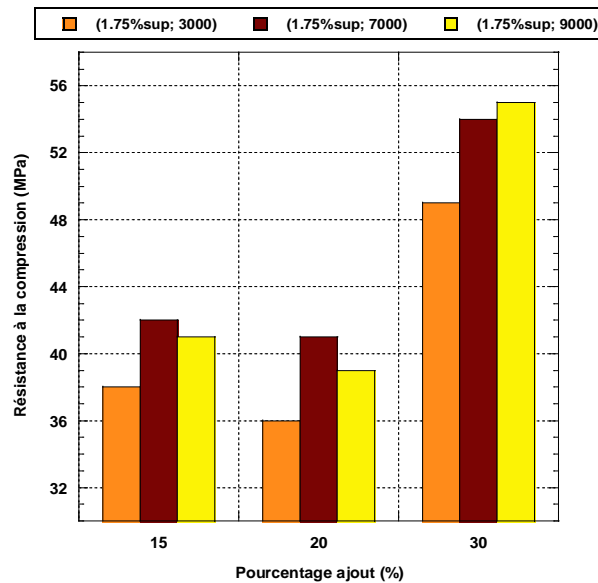
Selon R. Chaid [105] En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de CSH sont très denses ce qui induit une grande compacité.

Ces bétons présentent des résistances acceptables et restent dans la gamme des bétons courants. Ces bonnes résistances des BAP sont liées : au volume de pâte important, l'utilisation d'adjuvant réducteur d'eau dont l'effet bénéfique sur la résistance mécanique est connu et la présence d'une quantité importante de filler dont leurs action à un effet positif sur la compacité et par conséquent sur la résistance mécanique. Une amélioration de la résistance

à la compression est constatée pour les bétons MD 16, 17 et 18 par rapport au béton avec un taux faible en ajout. Ceci laisse supposer que l'excédent d'eau efficace, qui n'a pas participé à l'hydratation du ciment et au mouillage des granulats, est absorbé par les fines de marbre ce qui se traduit par l'accroissement de la résistance mécanique.



(a) Variation de la Rc à 1.5% de SP



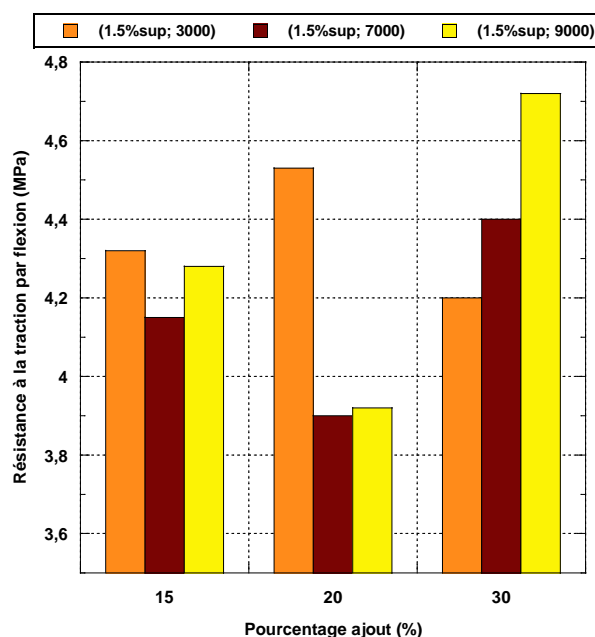
(b) Variation de la Rc à 1.75% de SP

Fig. VI-7 – Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.

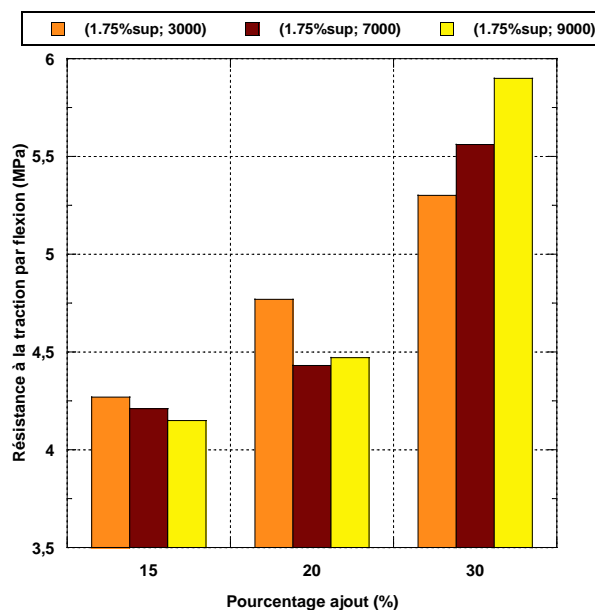
VI.3.6. Évolutions de la résistance à la traction par flexion des BAP

L'évolution de la résistance à la traction par flexion (R_f) est similaire à celle de la résistance à la compression, figure VI-7. Ce qui est évident du fait qu'il y a une proportionnalité entre ces deux caractéristiques. L'augmentation, de cette résistance à la

traction est moins prononcée que celle de la compression. Les raisons supposées à l'origine de cela sont les mêmes cités précédemment pour justifier l'accroissement de résistance à la compression, à savoir le broyage poussé malgré la faible réactivité de la poudre de marbre par rapport au ciment.



(a) Variation de la Rtf à 1.5% de SP



(b) Variation de la Rtf à 1.75% de SP

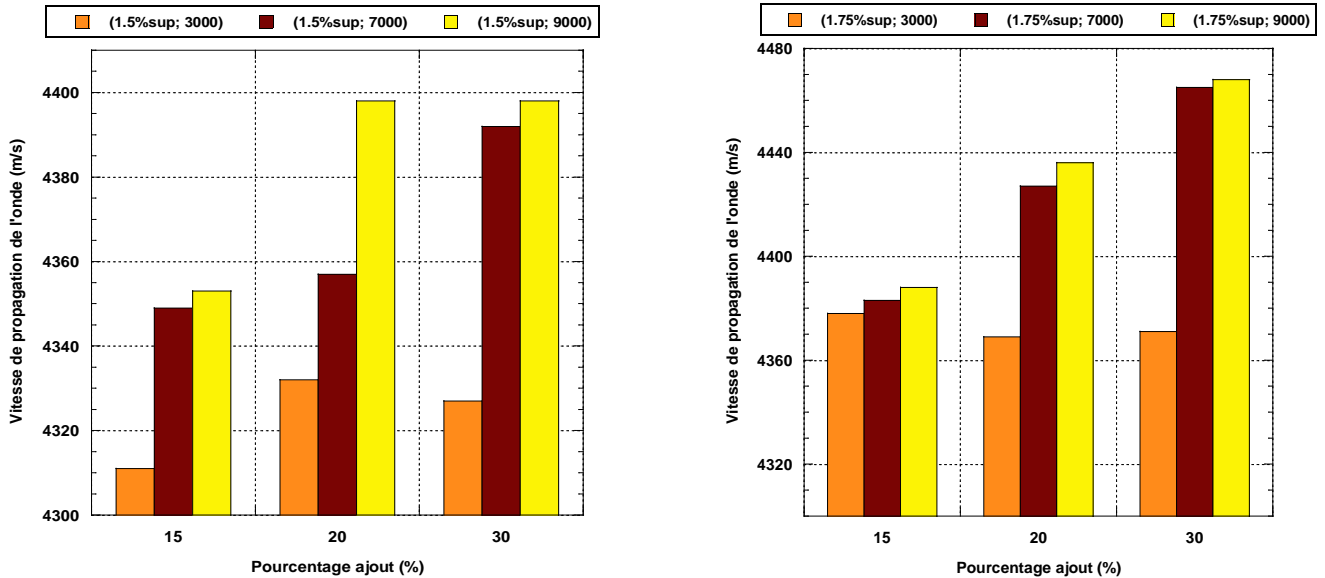
Figure III- 1 Variation de la résistance à la traction par flexion en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse

VI.3.7. Évolutions de la vitesse de propagation de l'onde à travers les éprouvettes de béton durci.

Les valeurs de la vitesse de propagation d'ondes à travers les BAP comportant différents teneurs en PM, pour 56 jours sont présentées sur la figure VI-8. D'après ces valeurs, on

constate, une augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec l'accroissement de la teneur en PM.

L'évolution des vitesses de propagation d'ondes présente un comportement tout à fait similaire à celui des résistances à la compression. L'augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec l'augmentation de la teneur en PM peut être expliquée par l'augmentation de la densité des mélanges.



(a) Variation de la Vitesses de propagation d'ondes à 1.5% de SP

(b) variation de la Vitesses de propagation d'ondes à 1.75% de SP

Fig. VI-8 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du pourcentage d'ajout, de superplastifiant et la finesse.

La plupart des formules empiriques reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sont non linéaires. Selon Neville [106], cette relation prend la forme suivante :

$$f_t = a (f_c)^b$$

Où f_t : résistance à la traction en MPa ; f_c : résistance à la compression en MPa ; a et b : constantes.

Dans le but de prédire un modèle mathématique reliant les résistances mécaniques des BAP, la figure VI-9 représente une corrélation entre les résistances à la compression et à la traction. Dans la même figure, cette corrélation est comparée à celles proposées par d'autres normes [107, 108, 109] cité par Boukhalkhal [103].

D'après la figure VI-9, On constate une augmentation quasi linéaire de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression. Une corrélation non linéaire similaire celle utilisée pour les bétons courants semble bonne, vu qu'elle a donné un bon coefficient de corrélation $R=0,95$.

En comparant notre modèle à ceux proposés par d'autres normes (BS 8007/87 : $f_t = 0,12f_c^{0,7}$ [104]; ACI 318/99 : $f_t = 0,5f_c^{0,5}$; BAEL 1999 : $f_t = 0,6+0,06f_c$ [102]), on constate qu'au même niveau de résistance à la compression, toutes les résistances à la traction déterminées suivant les autres modèles sont inférieures à celles estimées par notre modèle :

$f_t = 0.47x^{0.61}$. Ceci veut dire que les modèles reliant les résistances mécaniques des bétons traditionnels sous-estiment la résistance à la traction des BAP. Il est nécessaire donc de prédire des modèles reliant les résistances mécaniques propres aux BAP [103].

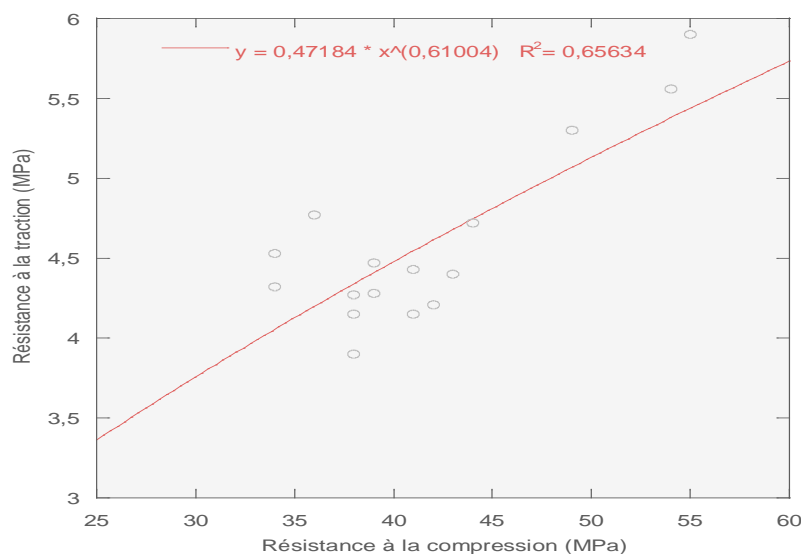


Fig. VI-9 – Corrélation entre les résistances mécaniques.

VI.4. CONCEPTION STATISTIQUE ET MODELISATION PAR DES PLANS D'EXPERIENCES.

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. Khayat et al., ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité.

Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

Les modèles statistiques développés dans cette étude peuvent faciliter l'optimisation des proportions des mélanges de BAP.

Un plan factoriel complet de 2^3 a été employé pour évaluer l'influence de deux niveaux (maximum et minimum) pour chacune des trois variables. Les variables choisies pour formuler des modèles mathématiques, afin d'évaluer les propriétés pertinentes d'un BAP sont le pourcentage et la finesse d'ajout ainsi que celui du superplastifiant.

Le nombre de mélange pour développer les modèles statistiques est de $2^3 = 8$ mélanges. Ces modèles sont valables pour une large gamme de mélanges avec un dosage en ajout variant de 60 à 120 kg, une SSB allant de 3000 à 9000 et un pourcentage en superplastifiant variant de 1,5 à 1,75 de la masse du ciment. Les réponses qui ont été modélisées sont : l'écoulement dans un milieu confiné et non confiné, la stabilité au tamis, la résistance à la compression, la

résistance à la traction par flexion et la vitesse de propagation d'onde. Le codage et les niveaux des variables de conception du mélange sont donnés dans le tableau VI-3.

Tableau VI-3 – Codage et valeurs absolues des paramètres étudiés.

Paramètres	Codage des valeurs				
	-1	-0,5	0	+0,5	+1
Ajout(%)	15	20	22,5	25	30
Finesse (SSB)	3000	4500	6000	7500	9000
Superplastifiant (%)	1,25	1,37	1,5	1,625	1,75

VI.4.1. Développement des modèles.

Les résultats des 8 mélanges, statistiquement équilibrés avec les trois variables (SSB : finesse de l'ajout PM, % d'aj: % d'ajout PM, % SP : % Superplastifiant) qui peuvent avoir une influence significative sur les caractéristiques des BAP, ont été utilisés pour développer des modèles statistiques pour prédire les propriétés des BAP. Le logiciel MINITAB 16 a été utilisé pour dériver les modèles par des effets significatifs de Pareto et la corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées.

Pour nos résultats, nous n'avons pris en considération que les coefficients des facteurs et des interactions qui sont significatifs ($p \leq 0,05$). La majorité des modèles proposés ont des coefficients de détermination élevés.

Nous pouvons identifier les facteurs statistiquement influents situés à droite des traits rouge vertical. Celui-ci correspond à un indicateur de risque statistique critique utilisé dans le plan d'expérience prenant en compte les degrés de libertés et les interactions possibles.

Les modèles statistiques dérivés pour la masse volumique à l'état frais, l'étalement, la boîte en L, la stabilité au tamis, la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et la vitesse de propagation de l'onde sont résumées ci-dessous avec des variables exprimées en valeurs codés. Les modèles reflètent la signification relative de chaque paramètre sur les réponses.

Les signes négatifs devant chacun de ces facteurs montrent qu'une augmentation des facteurs % d'ajout, SSB et % d'adjuvant conduisent dans notre cas à une diminution des valeurs de module.

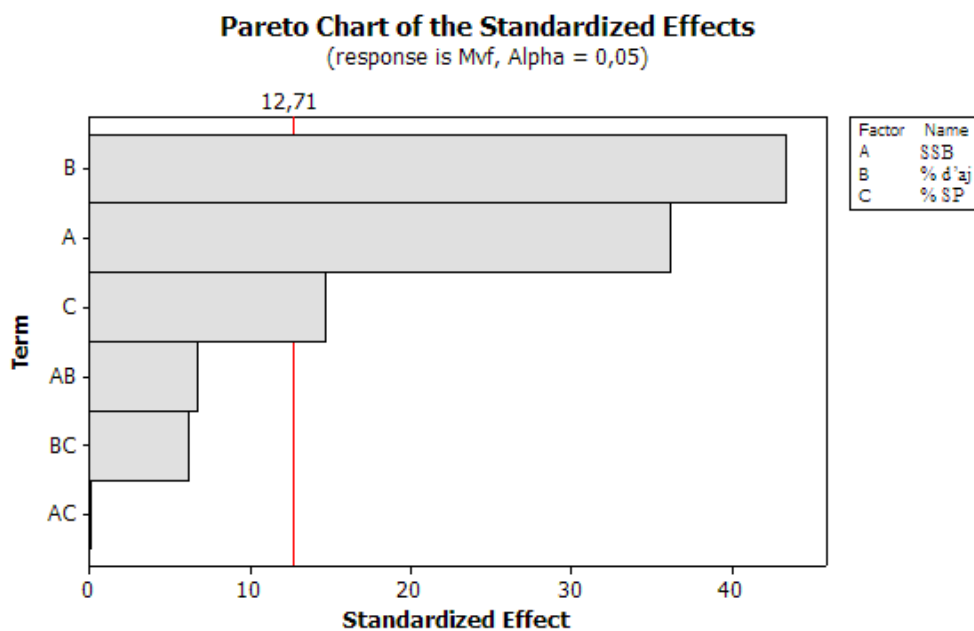


Fig. VI-10 – Diagramme de Pareto relatif à la masse volumique à l'état frais.

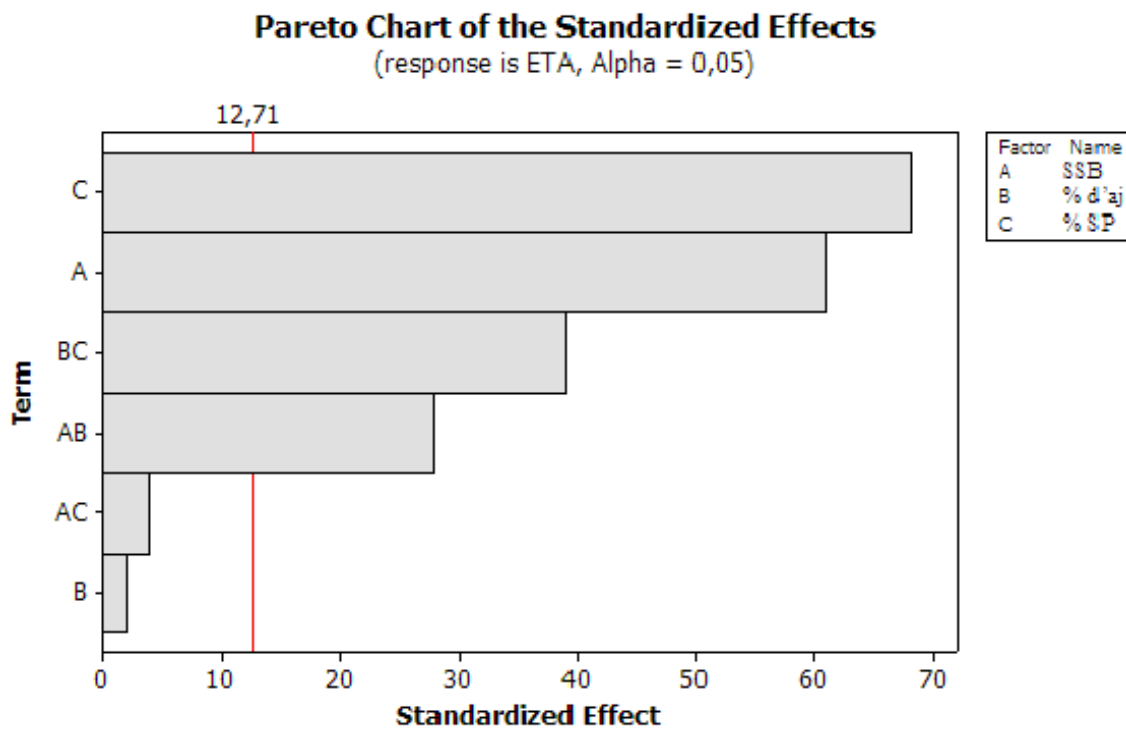


Fig. VI-11 – Diagramme de Pareto relatif à l'étalement.

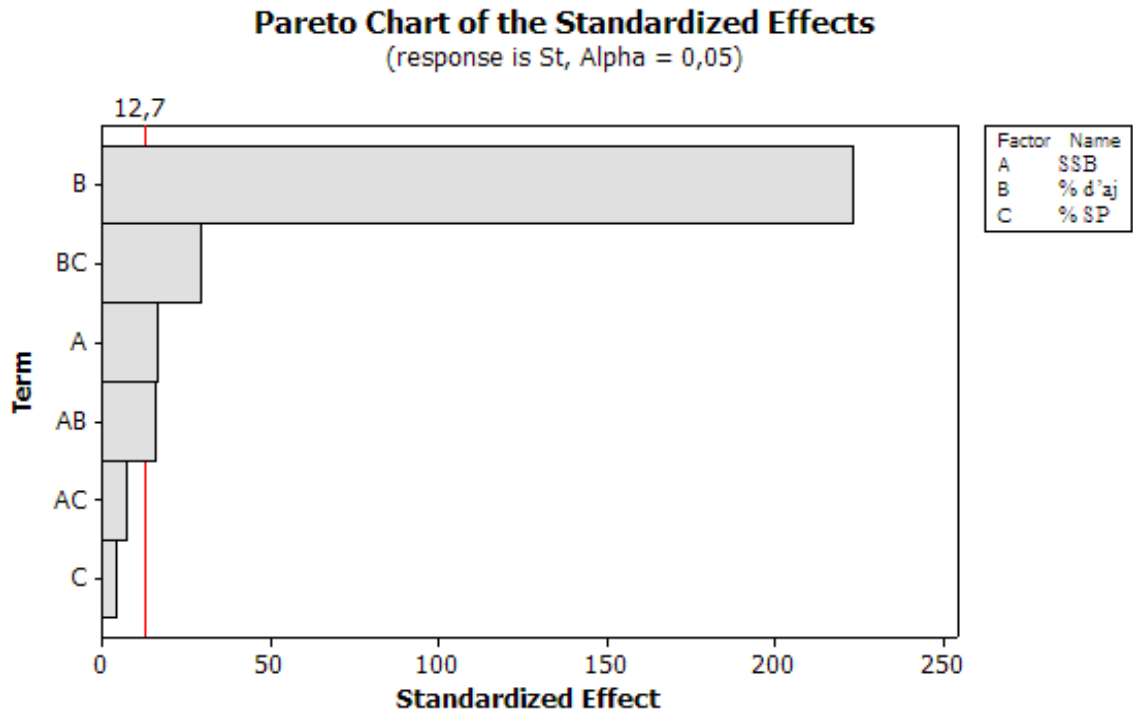


Fig. VI-12 – Diagramme de Pareto relatif à la stabilité au tamis.

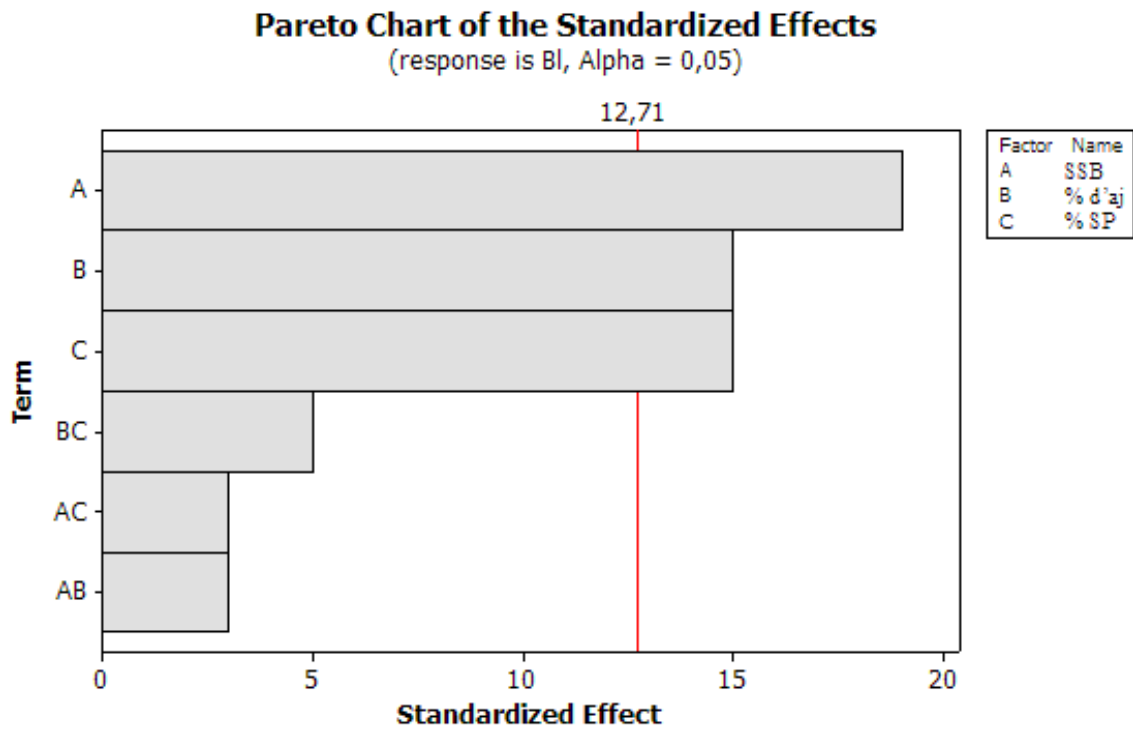


Fig. VI-13 – Diagramme de Pareto relatif à la boîte en L

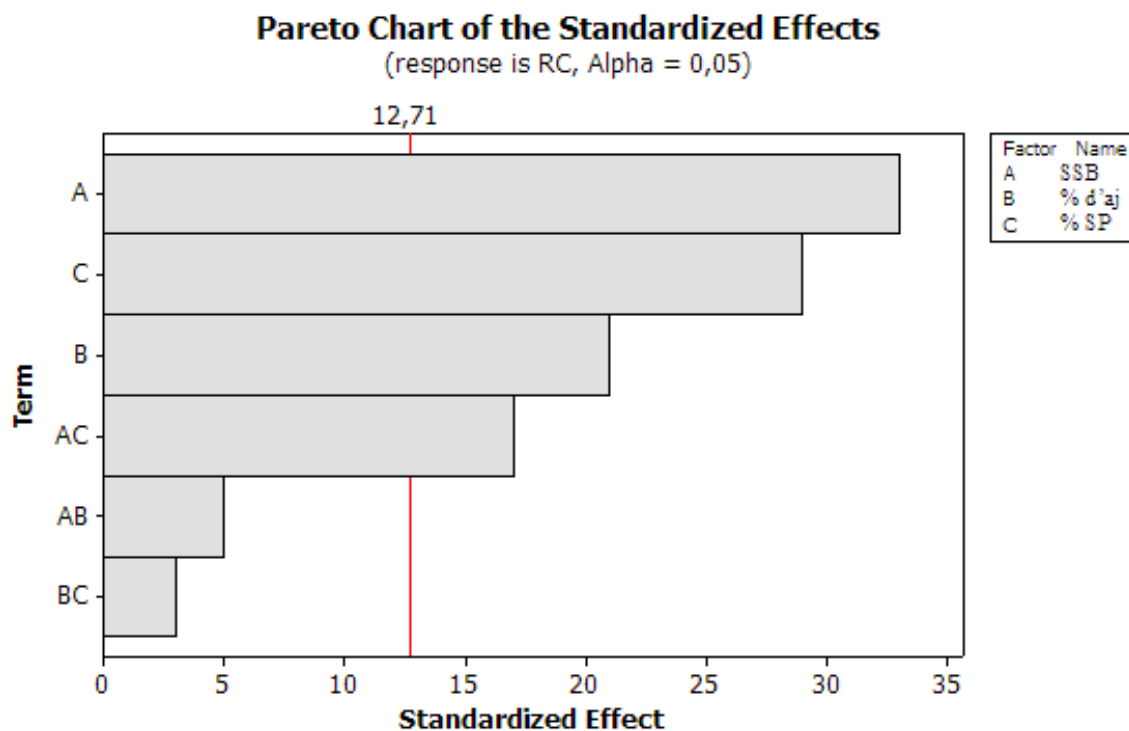


Fig. VI-14 – Diagramme de Pareto relatif à la résistance compression.

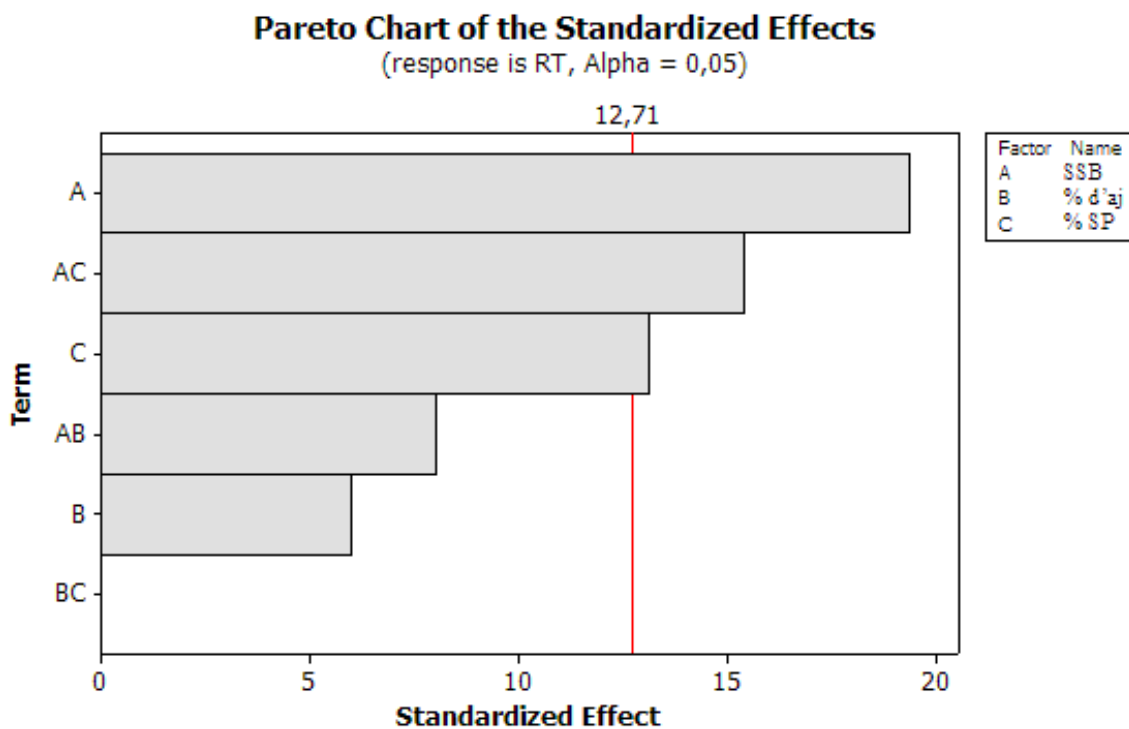


Fig. VI-15 – Diagramme de Pareto relatif à la traction par flexion.

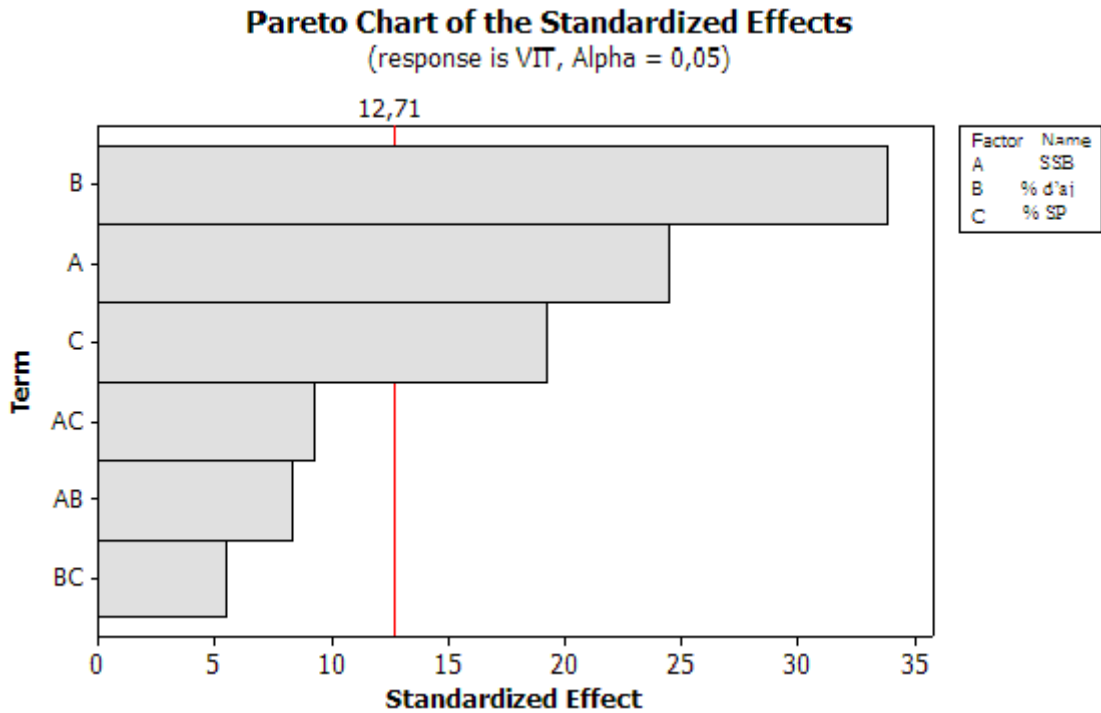


Fig. VI-16 – Diagramme de Pareto relatif à la vitesse de propagation de l'onde.

Le test de Pareto nous a également fournit une fonction mathématique à partir de laquelle il est théoriquement possible de calculer les caractéristiques d'un BAP à l'état frais et durcis connaissant son SSB, le % d'ajout et le % du superplastifiant.

Dans le but de vérifier les modèles proposés, il a été procédé à la confrontation des résultats expérimentaux obtenus sur l'ensemble des BAP avec ceux calculés par les modèles. On note, que les deux résultats prédits et mesurés se rapprochent.

Modèle 1 : La masse volumique.

$$Mv \text{ (kg/m}^3\text{)} = 2393,93 + 31,62 Aj + 37,88 \text{ FIN} + 12,87\text{Sup.} \quad R^2=0,976$$

À partir du modèle dérivé, on constate que l'augmentation de la masse volumique dépend de la SSB, % d'ajout et le % du superplastifiant. D'après ce modèle l'effet couplé n'a pas d'influence sur la masse volumique.

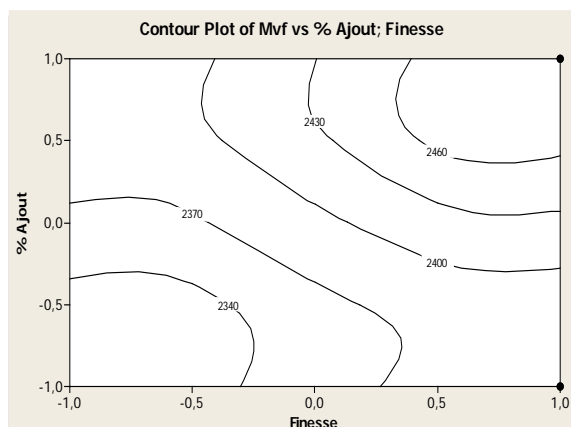


Fig. VI-17 – Iso réponse de la masse volumique en fonction du % ajout et la SSB.

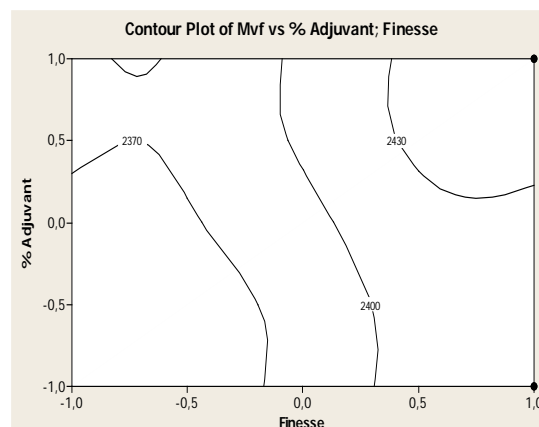


Fig. VI-18 – Iso réponse de la masse volumique en fonction du % superplastifiant et la SSB.

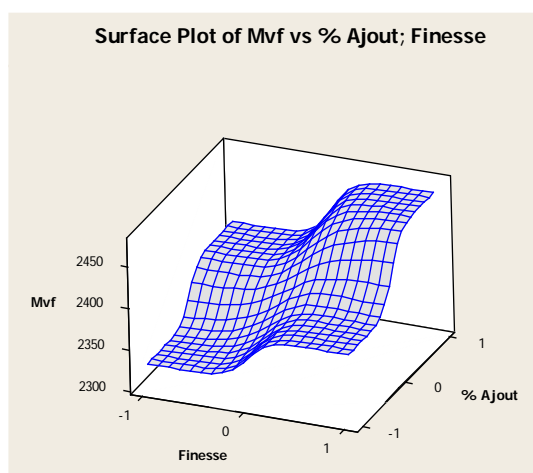


Fig. VI-19 – Surface de réponse de la masse volumique en fonction du % ajout et la SSB.

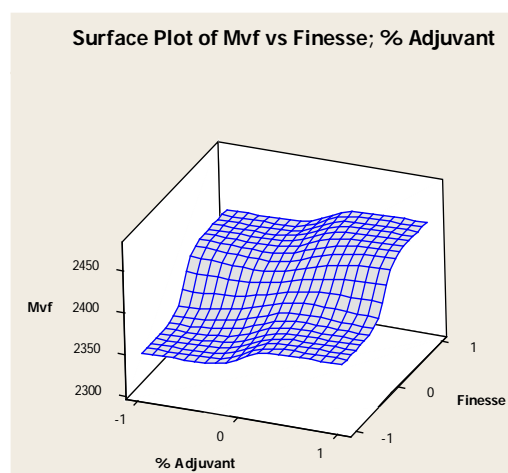


Fig. VI-20 – Surface de réponse de la masse volumique en fonction du % superplastifiant et la SSB

La représentation graphique (figure VI-19 et 20) des effets des facteurs permet de se rendre compte qu'il ya une proportionnalité entre la masse volumique à l'état frais et % d'ajout, SSB et % d'adjuvant. La masse volumique dépend, en premier lieu de la finesse et le % d'ajout ces derniers occupent les pores et augmente la compacité. En second lieu du % d'adjuvant qui a un effet moins important car ce dernier assure la défloculation qui améliore la fluidité et permet un réarrangement optimal des grains.

Modèle 2 : L'étalement.

$$ETAL (mm) = 666,75 + 17 \text{ Sup} - 7 \text{ Aj} * \text{FIN} - 9,75 \text{ FIN} * \text{Sup}.$$

$$R^2=0,65$$

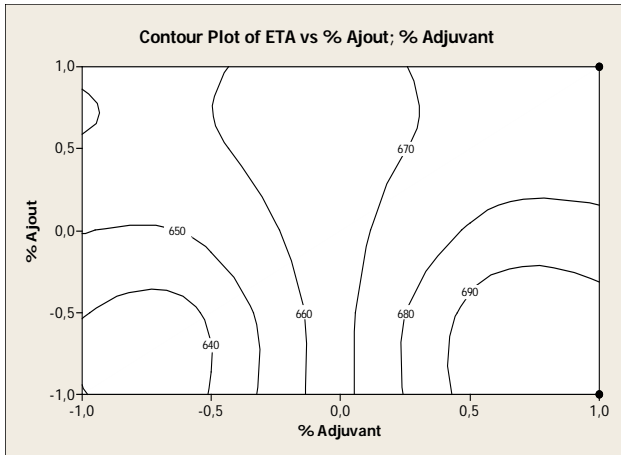


Fig. VI-21 – Iso réponse de l'étalement en fonction du % ajout et la SSB.

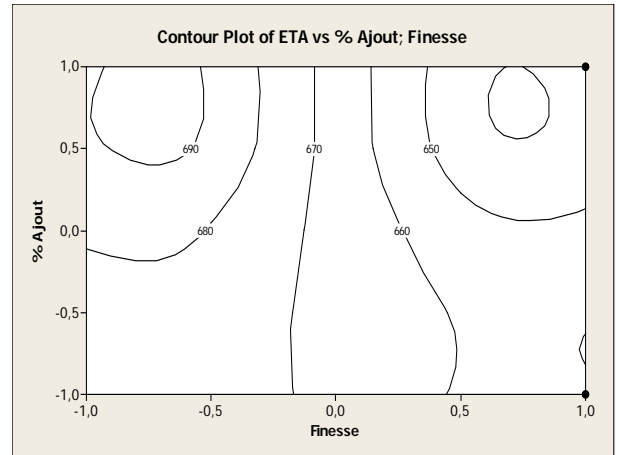


Fig. VI-22 – Iso réponse de l'étalement en fonction du % superplastifiant et la SSB.

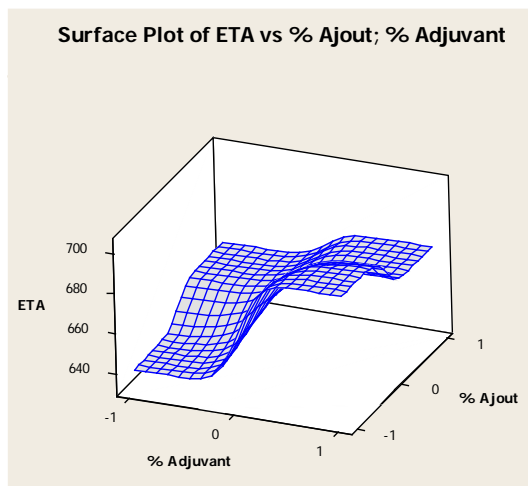


Fig. VI-23 – Surface de réponse de l'étalement en fonction du % ajout et la SSB.

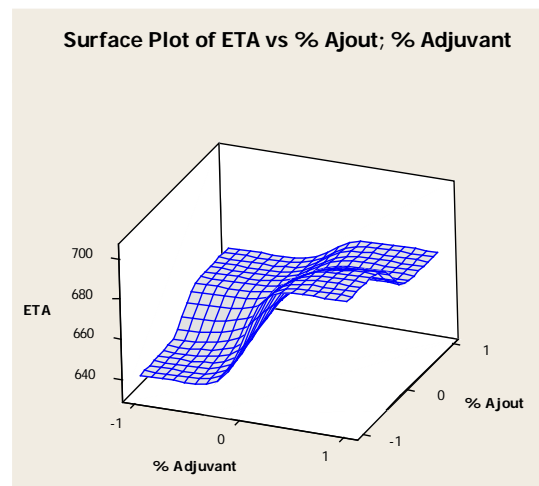


Fig. VI-24 – Surface de réponse de l'étalement en fonction du % superplastifiant et la SSB

À partir du modèle dérivé, on constate que l'augmentation de l'étalement est conditionnée par l'accroissement de la teneur en adjuvant. L'interaction du % d'ajout et la finesse ainsi que l'interaction finesse et % d'adjuvant est significativement négative à cause de l'effet négative du % d'ajout et l'augmentation de la finesse, donc plus la quantité d'ajout et la finesse augmente plus l'étalement diminue.

Modèle 3 : Stabilité au tamis.

$$\text{Stabilité (\%)} = 5,52 + 0,082 \text{ Aj} + 1,1175 \text{ FIN} + 0,08 \text{ Aj} \times \text{FIN} - 0,14 \text{ FIN} \times \text{Sup. } R^2=0,998$$

Le modèle montre que l'accroissement du dosage en adjuvant est néfaste au niveau de la stabilité, et montrent qu'elle dépend, d'abord du % d'ajout qui est l'effet le plus important. En second lieu, l'effet positif de la finesse. Subséquemment, il est constaté une influence de moindre importance de l'interaction % d'ajout-finesse.

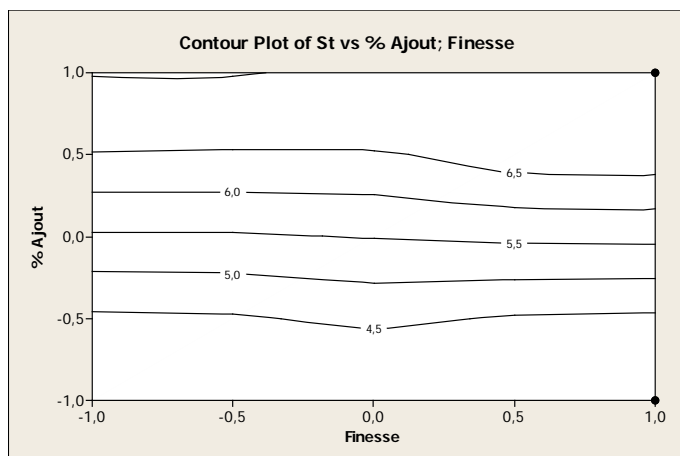


Fig. VI-25 – Iso réponse de la stabilité au tamis en fonction du % ajout et la SSB.

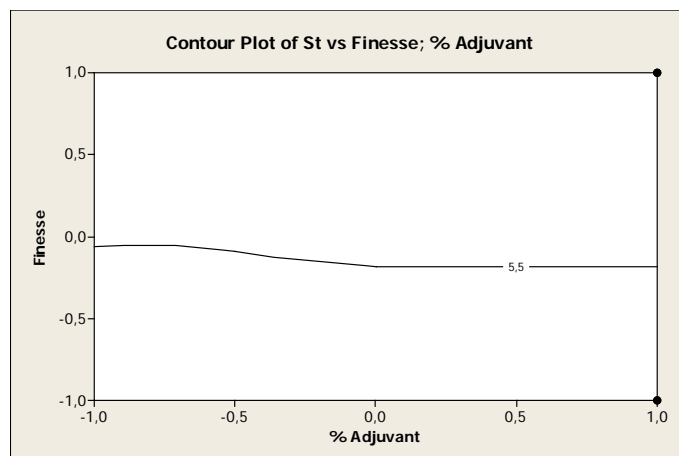


Fig. VI-26 – Iso réponse de la stabilité au tamis en fonction du % superplastifiant et la SSB.

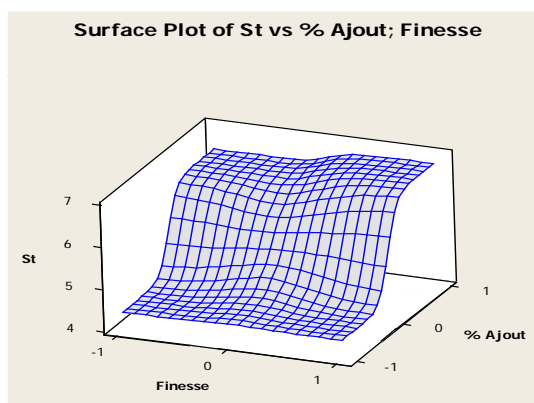


Fig. VI-27– Surface de réponse de la stabilité au tamis en fonction du % ajout et la SSB.

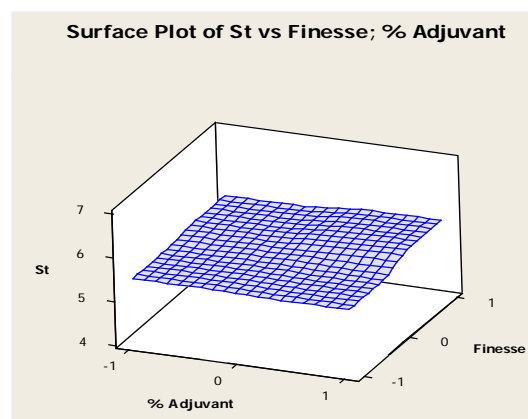


Fig. VI-28 – Surface de réponse de la stabilité au tamis en fonction du % superplastifiant et la SSB.

Modèle 4 : La boîte en L.

$$\text{Boîte en L (\%)} = 0,891 + 0,023 \text{ Aj} - 0,018 \text{ Fin} + 0,018 \text{ Sup.} \quad R^2=0,9485$$

Le modèle statique dérivé montre clairement que la capacité de passage est moins influencée par les paramètres d'études comme l'indique les coefficients de chaque paramètre. Ce critère est plutôt piloté par les granulats dans le mélange.

Toutefois nous avons remarqué que l'augmentation du % d'ajout, la finesse et le % d'adjuvant a abouti à l'amélioration de la capacité de passage. En effet, l'augmentation du % d'ajout avec l'augmentation de la finesse a permis de remplir les vides disponibles entre les particules, et ont participé de ce fait à améliorer l'arrangement du squelette granulaire dans la matrice du mortier.

En contrepartie, l'adjuvant a permis d'éviter l'agglomération des particules de ciment et des fines particules et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats ce qui participe à l'amélioration de la fluidité. Les granulats se sont retrouvés enveloppés par une plus grande quantité de pâte. Cette action a permis d'éviter le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures et a permis donc d'éviter l'interruption de l'écoulement par colmatage.

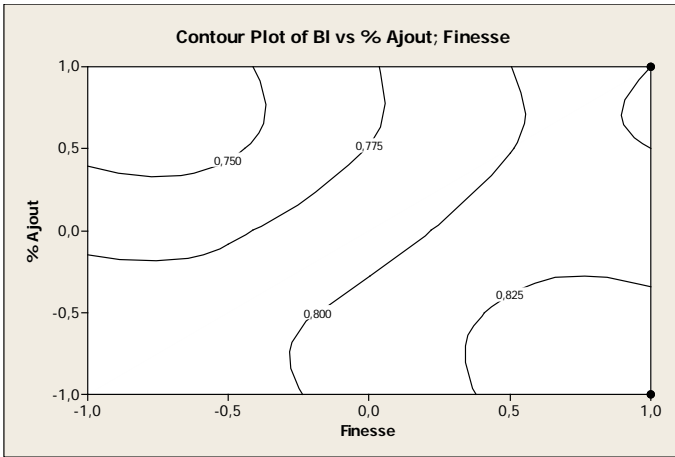


Fig. VI-29 – Iso réponse de la boîte en L en fonction du % ajout et la SSB.

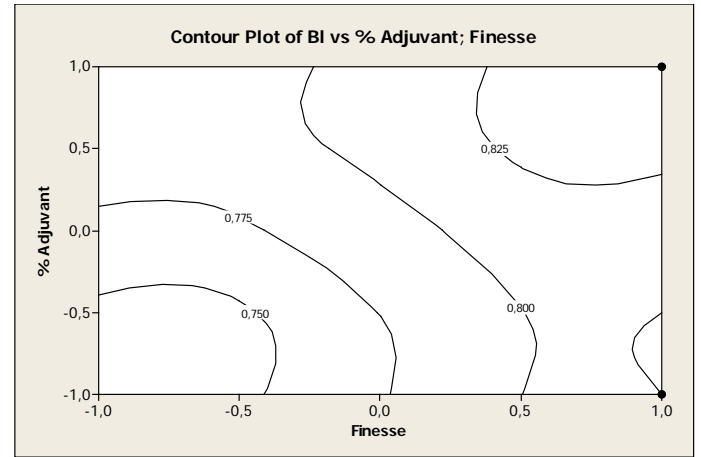


Fig. VI-30 – Iso réponse de la boîte en L en fonction du % superplastifiant et la SSB.

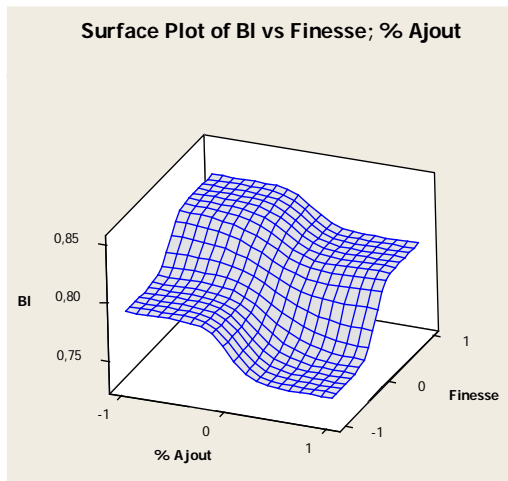


Fig. VI-31 – Surface de réponse de la boîte en L en fonction du % ajout et la SSB.

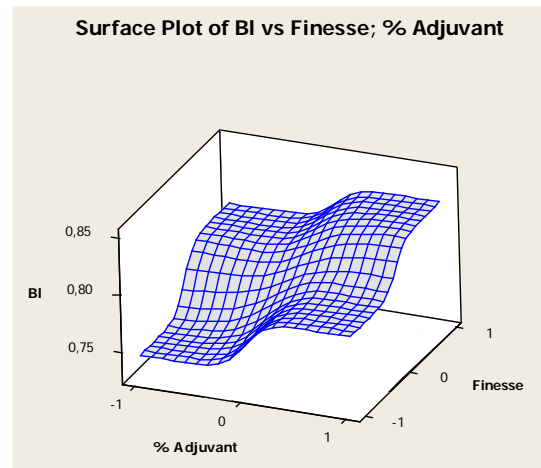


Fig. VI-32 – Surface de réponse de la boîte en L en fonction du % superplastifiant et la SSB

Modèle 5 : La résistance à la compression.

$$R_c \text{ (MPa)} = 42,125 + 4,125 A_j + 2,625 F_{in} + 3,625 S_{up} + 2,125 A_j \times S_{up}$$

$R^2=0,987$

Le modèle statique montre que la résistance à la compression est moins influencée par les paramètres d'étude comme l'indique les coefficients de chaque paramètres. Cette caractéristique est plutôt gouverner par le dosage en ciment. .

Néanmoins nous avons constaté que la résistance à la compression dépend, en premier lieu du % d'ajout qui est l'effet le plus important car il augmente la compacité du béton et par conséquent la résistance à la compression. En second lieu, l'effet positif de l'adjuvant. Cela est dû à son pouvoir défloculant qui améliore la fluidité et dès lors la compacité.

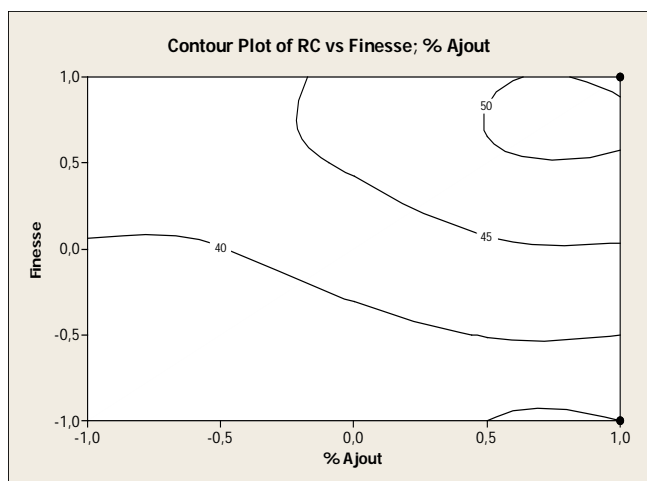


Fig. VI-33 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.

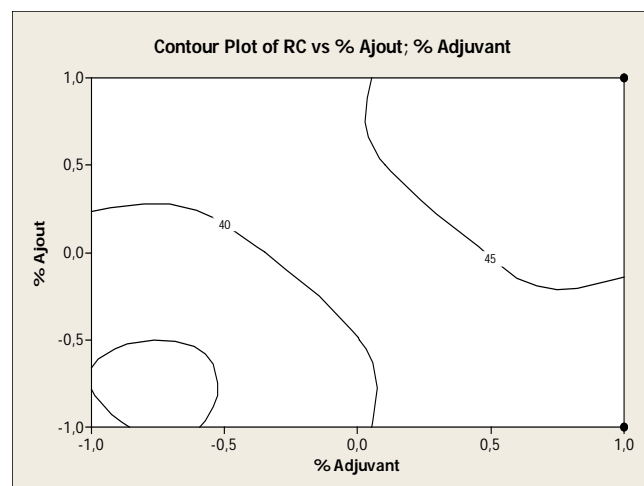


Fig. VI-34 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB.

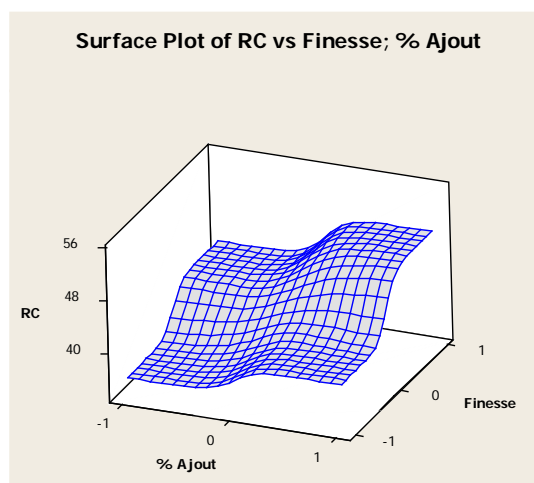


Fig. VI-35 – Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.

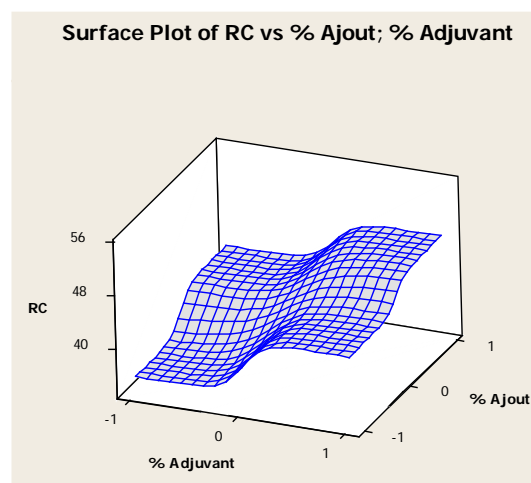


Fig. VI-36 – Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB

Modèle 6 : La résistance à la traction en flexion.

$$R_t = 4,6425 + 0,3875 A_j + 0,2625 S_{up} + 0,3075 A_j \times S_{up} \quad R^2=0,885$$

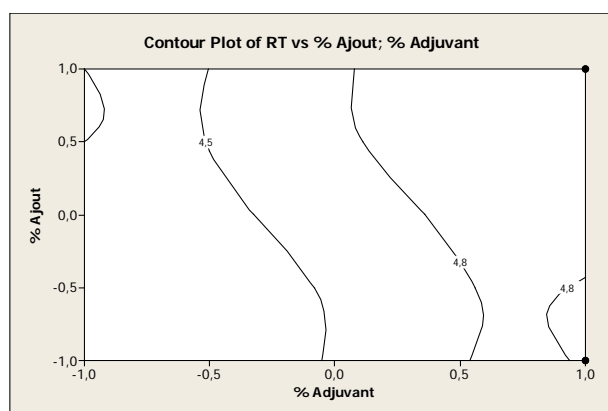


Fig. VI-37 – Iso réponse de la résistance à la compression en fonction du % ajout et la SSB.

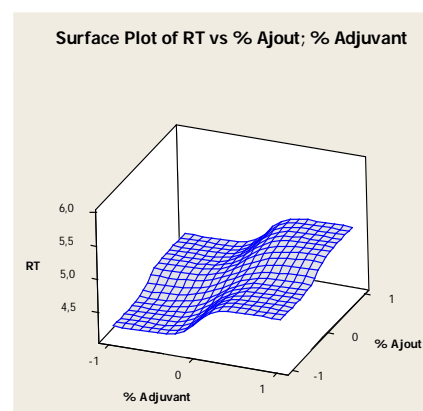


Fig. VI-38 – Surface de réponse de la résistance à la compression en fonction du % superplastifiant et la SSB

Le modèle statique de la résistance à la traction par flexion est presque similaire à celui de la résistance à la compression. Ce qui est évident du fait qu'il y a une proportionnalité entre ces deux caractéristiques qui sont influencés par le ciment qui est l'effet le plus important.

Modèle 7 : La vitesse de propagation de l'onde.

$$VPO = 4366,5 + 24,5 Aj + 33,75 FIN + 19,25 Sup.$$

$$R^2=0,919$$

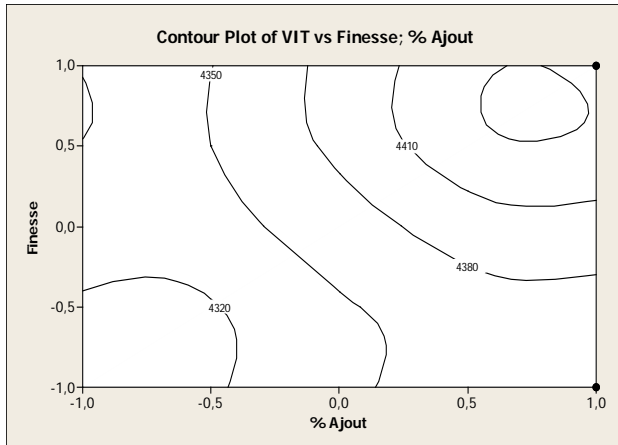


Fig. VI-39 – Iso réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % ajout et la SSB

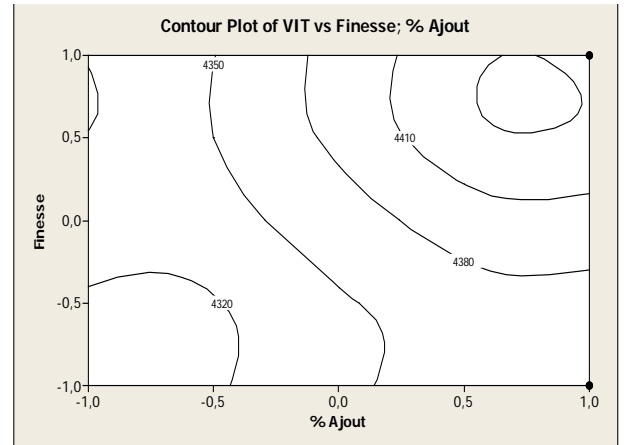


Fig. VI-40 – Iso réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % superplastifiant et la SSB.

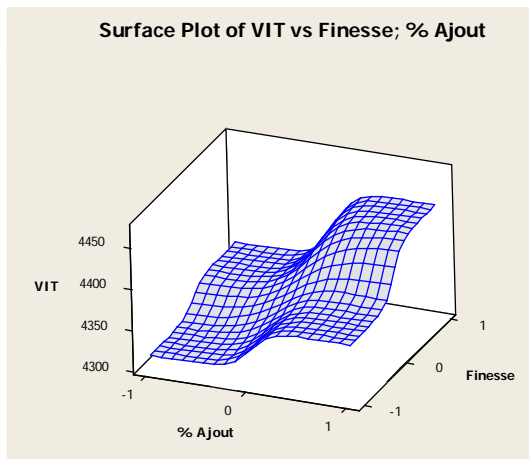


Fig. VI-41 – Surface de réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % ajout et la SSB.

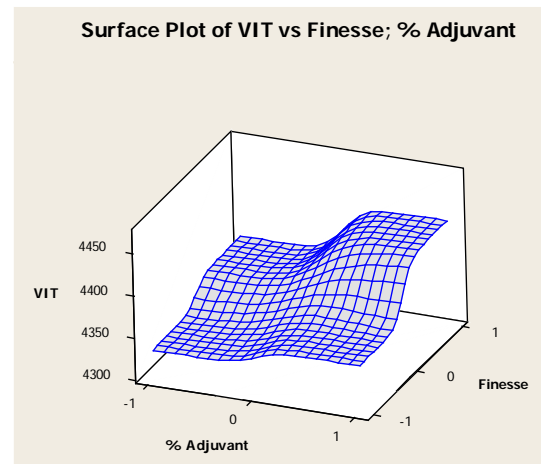


Fig. VI-42 – Surface de réponse de la vitesse de propagation de l'onde en fonction du % superplastifiant et la SSB.

À partir du modèle statique dérivé on constate que la vitesse de propagation de l'onde est en fonction des trois paramètres étudiés. La finesse et le % d'ajout qui présente une SSB supérieure à celle du ciment ont une influence directe sur la compacité ainsi que le % d'adjuvant qui assure un meilleur arrangement du squelette granulaire.

CONCLUSION.

L'objectif de ce travail est d'apporter des outils autant théoriques que pratiques, pour l'optimisation de la composition des BAP. Les développements se sont concentrés sur la mise

au point et l'application de stratégies d'optimisation, par l'utilisation exclusive de la méthode des plans d'expériences (MPE).

À partir de 03 paramètres expérimentaux, un plan factoriel complet nous a permis dans un premier temps de classer les facteurs par ordre de leur importance sur les propriétés rhéologiques et les propriétés mécaniques des BAP. Ensuite, les paramètres les plus influents (% d'ajout, SSB, % d'adjuvant) ont été optimisés à l'aide d'un plan à surfaces de réponses pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du béton.

Ces modèles statistiques procurent un moyen efficace pour l'évaluation de l'effet des paramètres du mélange pour pouvoir réduire le nombre d'essais à réaliser.

VI.5. VALORISATION DE LA POUDRE DE MARBRE ET LES FILLERS CALCAIRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS (L'EFFET DE LA SSB).

La composition optimale est celle du béton autoplaçant avec 30% d'ajout de poudre de marbre et 1,75% de superplastifiant sur la base de cette donnée une autre campagne expérimentale est proposée pour valoriser la poudre de marbre en la comparant au calcaire (ajout connu et beaucoup exploité).

VI.5.1. Propriétés à l'état frais.

Après formulation, une étude des propriétés du BAP est établie pour vérifier le comportement à l'état frais, qui se manifeste dans l'étalement pour les milieux non confiné, ainsi que son écoulement dans les milieux confiné illustré dans la boîte L (L - box), le temps d'écoulement intermédiaires a été mesuré ; il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre d'étalement de 500 mm, noté t_{500} et le taux de ségrégation mesuré par l'essai de stabilité au tamis.

Le tableau ci-après présente les résultats des essais rhéologiques des BAP ainsi que leurs masses volumiques, pour la poudre de marbre et le filler calcaire, en sachant que les essais sont faits à trois (3) SSB différentes (3000, 7500, 9000).

Tableau VI-4 – Caractéristiques rhéologiques des BAP avec poudre de marbre et filler calcaire.

	Poudre de marbre (PM)			Fines calcaire (FC)		
	3000	7500	9000	3000	7500	9000
SSB (cm ² /g)	3000	7500	9000	3000	7500	9000
T500 (s)	5,12	8,23	10,31	3,37	5,27	7,73
Étalement (mm)	685	670	650	730	710	680
L box (%)	0,90	0,87	0,83	0,96	0,93	0,91
Stabilité (%)	4,32	5,4	6,71	5,13	6,67	7,88
Mv (Kg/m ³)	2400,3	2431,7	2475,2	2321,8	2351,4	2383,7

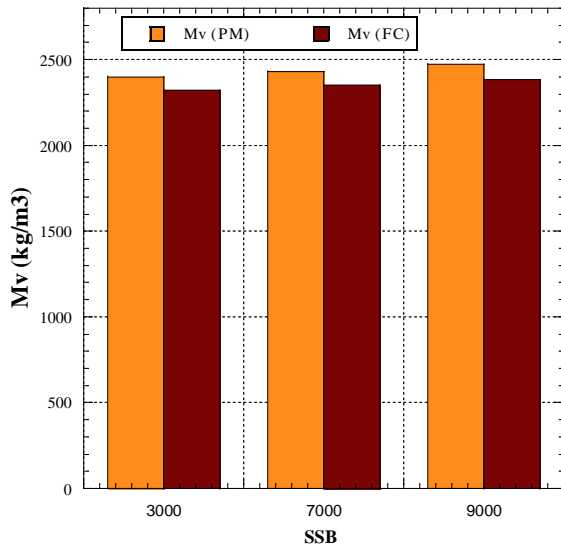


Fig. VI-43 – Évolution de la masse volumique en fonction de la SSB

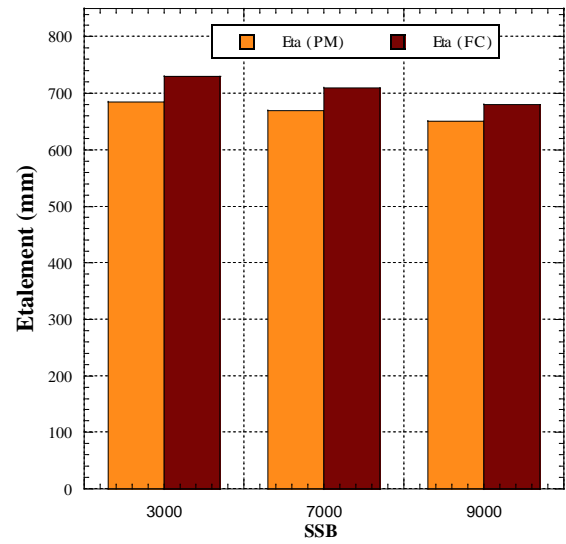


Fig. VI-44 – Évolution de l'étalement en fonction de la SSB

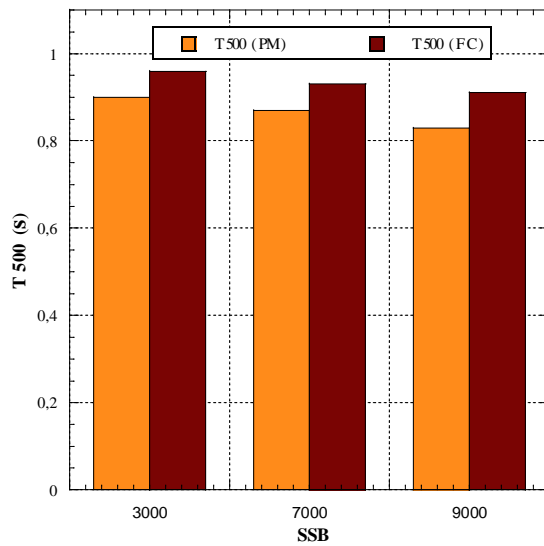


Fig. VI-45 – Évolution de temps t500 en fonction de la SSB

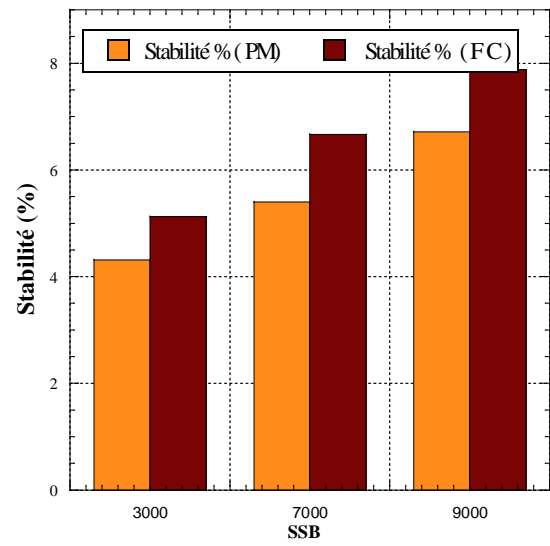


Fig. VI-46 – Évolution de la stabilité en fonction de la SSB

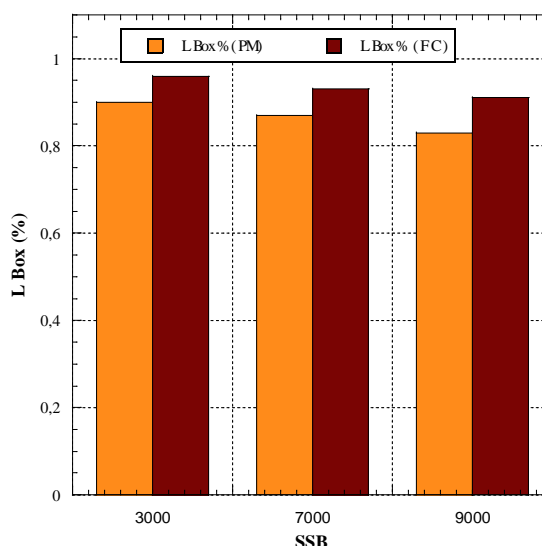


Fig. VI-47 – Évolution de la boîte en L en fonction de la SSB

D'après la figure VI-43 on observe que la masse volumique des BAP (PM) est supérieure à celle des BAP (FC), mais dans les deux cas, elle augmente en augmentant la SSB.

En notant, que les BAP confectionnés avec la poudre de marbre présentent une masse volumique supérieure à celle du calcaire, du fait que la poudre de marbre à une (Mv) supérieure au premier lieu, et qu'en augmentant la SSB les grains deviendront ultra fin et suite à leurs formes géométrique proche à celles de la fumée de silice, ce qui favorise leurs pénétration dans les interstices que les grains de ciment non pas accès. Par conséquent l'élimination des vides porte un béton plus dense.

Il faut rappeler que l'ensemble des bétons sont considérés comme autoplaçants, un béton qui forme une galette d'un diamètre compris entre 600 et 730 millimètres. D'après la présentation ci-dessus on constate que l'étalement diminue avec l'augmentation de la SSB conséquemment, il y a une relation inversement proportionnelle entre l'étalement et la SSB.

Cette relation peut être expliquée par l'effet de l'augmentation de la viscosité due à l'augmentation de la SSB par conséquent, l'augmentation de l'absorption d'eau.

Pour les BAP, des temps d'écoulement intermédiaires ont été mesurés. Il s'agit du temps nécessaire pour atteindre un diamètre de 500 mm, noté T₅₀₀ [6]. Pour l'ensemble des bétons le T₅₀₀ diminue avec l'augmentation de la SSB, d'où ce paramètre donne une appréciation sur la vitesse d'étalement qui est en relation directe avec la viscosité.

De l'essai de stabilité au tamis, on observe que le taux de laitance est proportionnel à la SSB, car l'augmentation de la SSB conduit à une augmentation du volume de la pâte en gardant le même % d'ajout.

Le taux de laitance des BAP avec poudre de marbre pour les différentes SSB est inférieur par rapport aux résultats trouvés pour le calcaire, cela est dû à l'effet d'absorption de la poudre de marbre, ainsi que sa nucléation élevée.

Bien que le taux de laitance dans les BAP (FC) est élevé par rapport à celui des BAP (PM), il reste dans l'intervalle de la norme (<15%), c'est-à-dire que notre béton respecte les exigences de l'AFGC.

L'essai de la boîte en L est le teste qui permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné. Les résultats trouvés dévoilent que le L Box se manifeste de la même façon que dans un milieu confiné. Dès que le ciment se met en contact avec l'eau, les réactions d'hydratations seront plus poussées et plus accélérées et la germination est facilité par la présence de la calcite qui existe dans la poudre de marbre, sans oublié l'absorption élevée de la poudre de marbre par rapport au calcaire et sans omettre que l'augmentation de l'absorption est en fonction de la SSB, ce qui traduit la variation de l'écoulement

VI.5.2. Propriétés à l'état durci.

Pour étudier la conformité de ces bétons aux exigences et aux normes de construction, une série de test est suivie afin de leur confier les commodes de cahier de charge. Des essais mécaniques sont effectués à 7, 28 et 56 jours.

Ces études effectuées concernent les résistances à la traction, que ce soit par flexion ou par fendage, et surtout pour la résistance à la compression. Suivies par d'autres contrôles tels que la masse volumique et l'absorption d'eau (après 28 jours de conservation), ce qui peut donner une appréciation sur la pénétration des agents agressifs (comme les ions chlorure et autre). Les résultats trouvés sont présentés dans les figures VI- 48, 49, 50, 51.

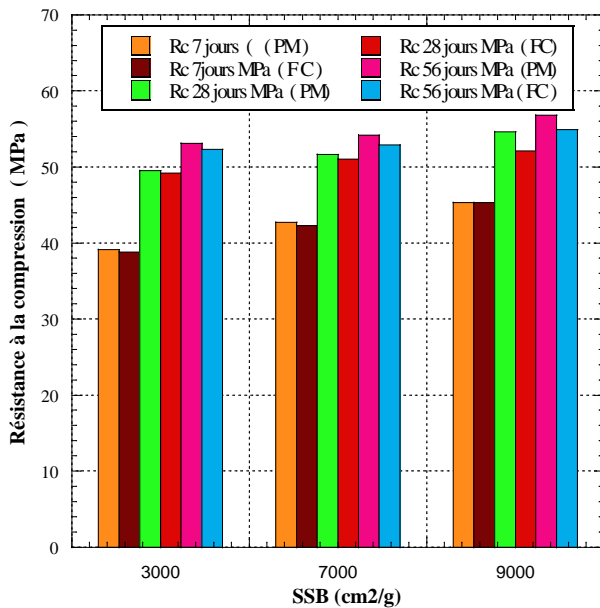


Fig. VI-48 – Variation de la Rc en fonction de la SSB

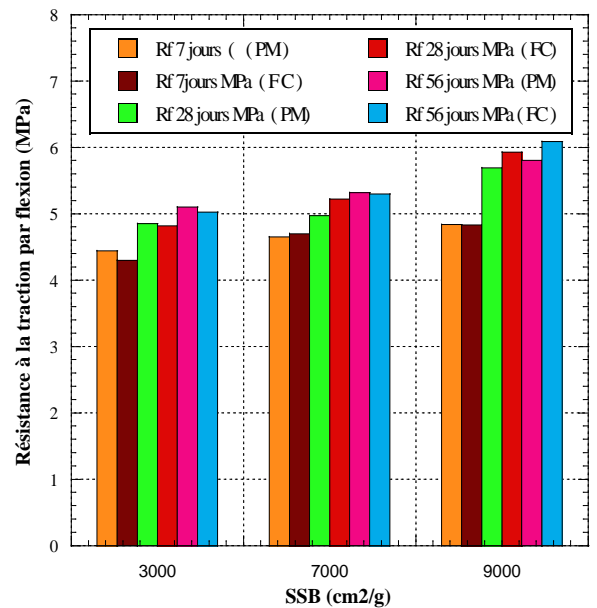


Fig. VI-49 – Variation de la Rtf en fonction de la SSB

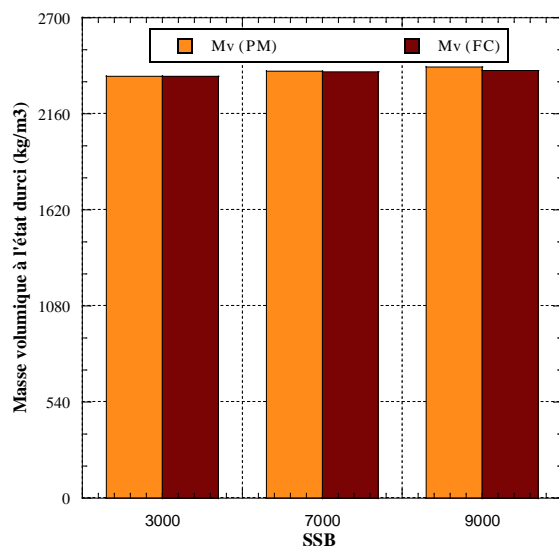


Fig. VI-50 – Variation de Mv en fonction de la SSB

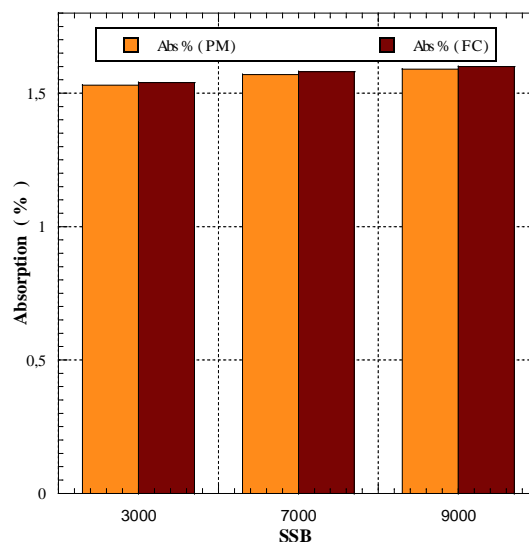


Fig. VI-51 – Variation de l'Abs en fonction de la SSB

On distingue que l'évolution des résistances est proportionnelle à l'augmentation de la SSB, ainsi que les résistances sont très élevées au jeune âge. Ce qui est le résultat d'un effet physique dit nucléation, la formation des C-S-H s'effectue facilement par accumulation, ce qui entraîne une hydratation poussée du C_3S .

Les résistances à la compression augmentent avec un taux d'accroissement de **17%** à 28 jours, ce qui correspond à l'hydratation poussée du (C_3S), où on arrive à des résistances similaires à celles des bétons performants, voire **54 MPa** pour les bétons dont la SSB est de l'ordre de $9000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Une croissance des résistances à la flexion est remarquée à chaque fois que la SSB se développe, ça peut s'expliquer par le fait que les réactions entre le ciment et l'eau sont plus

rapides en présence des fines et donc à chaque instant, il y a d'avantage d'hydrates formés. Ainsi que la proportionnalité est due au pouvoir des ultrafins d'accélérer les réactions d'hydratations du C_3S à très jeune âge (7 jours).

On constate aussi que les résistances s'améliorent avec l'évolution de la SSB, l'augmentation est d'environ 27% à 28 jours pour une SSB de $9000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

On décèle que le taux d'absorption est proportionnel à la progression de la SSB, ce qui signifie que l'absorption a une relation directe avec la nature de l'ajout (absorbant ou pas) et de sa finesse. Car la demande en eau augmente à chaque fois que l'ajout devient de plus en plus fin (ultrafin).

La masse volumique croît avec la SSB, parce que les fines pénètrent dans les zones et les endroits empêchés pour les grains de ciments. Ces interstices sont mieux remplis en augmentant la SSB, d'où on aura moins de vide, et par conséquent une structure plus compacte et en ressort, un béton plus dense et de résistances accrues.

VI.6. VALORISATION DE L'AJOUT POUVRE DE MARBRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES.

VI.6.1. Introduction.

Bien que les connaissances sur les BAP soient suffisantes pour permettre leur utilisation, certains aspects restent à améliorer. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en œuvre. La maîtrise de ces matériaux n'est pas encore acquise, comme en témoigne la diversité des études menées dans ce domaine. Les essais, mis au point pour caractériser le BAP à l'état frais, concernent deux propriétés essentielles et indissociables : la fluidité et l'homogénéité. Apparaissant comme contradictoires, elles sont toutes deux nécessaires pour l'obtention d'une construction finale d'une qualité esthétique indéniable, mais également conforme aux exigences techniques préconisées.

Par ailleurs, et afin d'améliorer les performances mécaniques en flexion et à la traction d'un béton autoplaçant l'incorporation de fibres est souvent une solution qui donne des résultats probants. Le béton de fibres trouve de plus en plus un emploi en pratique, notamment dans la réalisation des dallages, chaussées bétonnées des routes et de piste d'atterrissage des aérodromes, dans les éléments préfabriqués, et dans le renforcement des ouvrages dégradés.

Cependant des problèmes d'élaboration subsistent encore et exigent des études appropriées. L'emploi d'un tel béton nécessite une recherche rigoureuse de l'influence des paramètres tels que, le type de fibres, leur pourcentage, la longueur etc.

Les fibres ont pour rôle essentiel de contrôler le mécanisme de la fissuration. La rupture en traction du béton de fibres d'acier, devient plus ductile ce qui permet de compléter voire même se substituer à une partie non négligeable des armatures classiques pour certains types de sollicitations tel que celles des dallages, et des éléments minces. La présente partie s'intéresse à l'étude expérimentale d'un béton autoplaçant renforcés de fibres métalliques.

L'objectif principal de cette partie est d'obtenir un béton autoplaçant plus résistant en flexion et en traction "à noter que cet axe qui n'a pas fait l'objet de nombreuses recherches". La voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier à cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibre dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont aussi la capacité de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbants d'énergie. Cependant, cette amélioration est fonction de la géométrie et le % des fibres ainsi que leurs caractéristiques. Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibres à prévoir dans la formulation du BAP.

Le béton qui a fait l'objet de cette étude est un béton avec ajout de 30% de poudre de marbre avec une finesse \pm proche à celle du ciment et avec l'introduction de fibres métalliques. Pour chaque longueur (25, 30, 50) mm, quatre pourcentage (0,35 - 0,8 - 1 et 1,5) sont utilisés pour l'amélioration des performances des bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques. La présence des fibres au sein d'une matrice jouent le rôle de granulats ayant une forme allongée ; cette forme particulière peut engendrer des frottements parasite, créant ainsi

une augmentation de la porosité du fait de la perturbation de l'ordre dans lequel les grains sont arrangés ; ce bouleversement dans le squelette granulaire conduit à une diminution de la maniabilité et de la compacité, ce qui donne une faible ouvrabilité. Ce qui justifie la limitation des pourcentages des fibres. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élanement [110].

VI.6.2. Compositions étudiées.

Dans le chapitre précédent, nous avons observé que la poudre de marbre influence positivement sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. Nous nous efforcerons, dans cette partie, de comprendre l'influence de l'addition des fibres métalliques à crochets encollées sur le comportement des bétons autoplaçants. Ce chapitre est également destiné à montrer la faisabilité de l'élaboration des bétons autoplaçants fibrés ainsi que l'amélioration des propriétés mécaniques par rapport à celles des bétons sans fibres, en particulier à 28 jours. Après une analyse de l'influence des fibres sur les propriétés rhéologiques, nous poursuivons sur les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Treize (13) compositions ont été étudiées pour obtenir des compositions présentant des propriétés rhéologiques acceptables. Pour la composition de ce type de béton nous avons réalisé la même composition que celle du béton autoplaçant sans fibre à 30% d'ajout de poudre de marbre précédente mais avec l'incorporation des fibres à crochet à différents % et longueur.

Les compositions des bétons retenues pour cette étude sont présentées dans le tableau VI-5

Tableau VI-5 – Différentes compositions de béton.

	Ciment (kg/m ³)	Ajout (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	E /L	Sd (kg/m ³)	Sr (kg/m ³)	G 3/8 (kg/m ³)	G 8/15 (kg/m ³)	Lf (mm)	Mf (kg/m ³)	SP (l/m ³)	Av (l/m ³)
BAP T	400	120	172	0,33	182	636	420	387	/	/	7	/
BAPF 1					181	632	418	386	25	0,35		
BAPF 2					180	630	416	384		0,8		
BAPF 3					179	626	413	382		1		
BAPF 4					177,6	621	410	378,5		1,5		
BAPF 5					181	632	418	386	30	0,35		
BAPF 6					180	630	416	384		0,8		
BAPF 7					179	626	413	382		1		
BAPF 8					177,6	621	410	378,5		1,5		
BAPF 9					181	632	418	386	50	0,35		
BAPF 10					180	630	416	384		0,8		
BAPF 11					179	626	413	382		1		
BAPF 12	177,6	621	410	378,5	1,5							

VI.6.3. L'effet des fibres sur les propriétés rhéologiques.

Influence des fibres sur l'étalement.

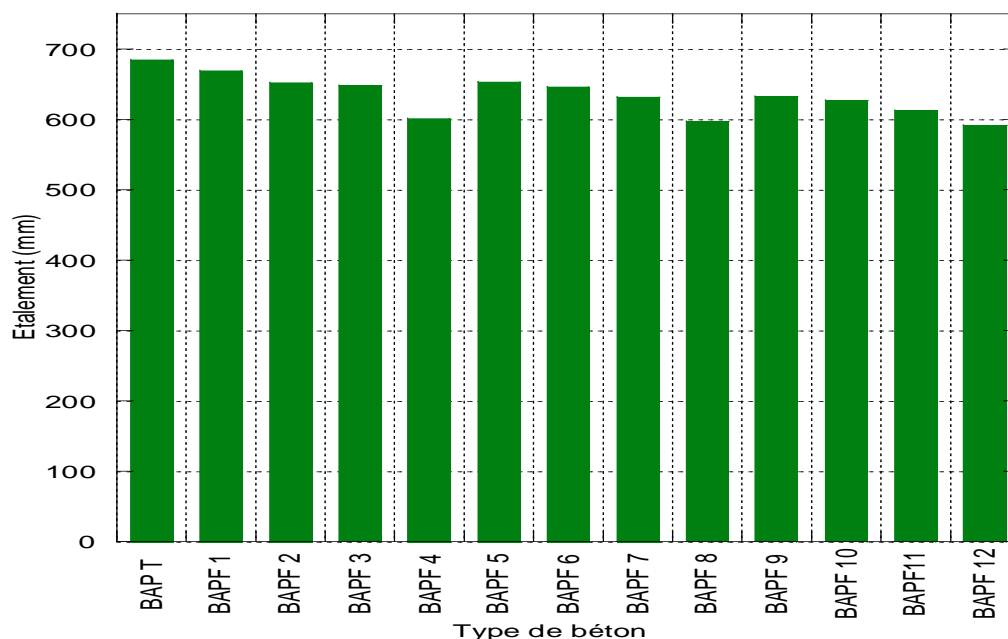


Fig. VI-52 – Variation de l'étalement en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.

De la figure VI-52, on remarque une légère réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés dont le % varie de 0,35 à 1 % par rapport au béton témoin par contre au-delà de 1 % l'étalement est affecté par le pourcentage et la longueur des fibres. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ceci conduit à une diminution de la maniabilité autrement dit les fibres ont une tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment pour entrer en contact avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité; dans le cas de fibres longues de 5 cm, cette réduction est plus importante pour le dosage de 1,5 % suite à leurs élancement qui bloquent le système lors de son étalement.

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre (600 et 850) mm selon [AFGC, 2008]. Les résultats obtenus et présentés sur la figure VI-52 montrent que tous les bétons ont des valeurs d'étalement situées à l'intérieur du domaine des BAP sauf le BAPF8 et le BAPF12, ces derniers présentent des résultats situés à proximité de cet intervalle. L'influence des fibres métalliques sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur longueur. En revanche les particules fines de l'addition poudre de marbre remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice [Yahia, 2005] [111]. Par conséquent la quantité d'eau qui occupait les vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Cependant, au-delà d'un dosage critique en fibres, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

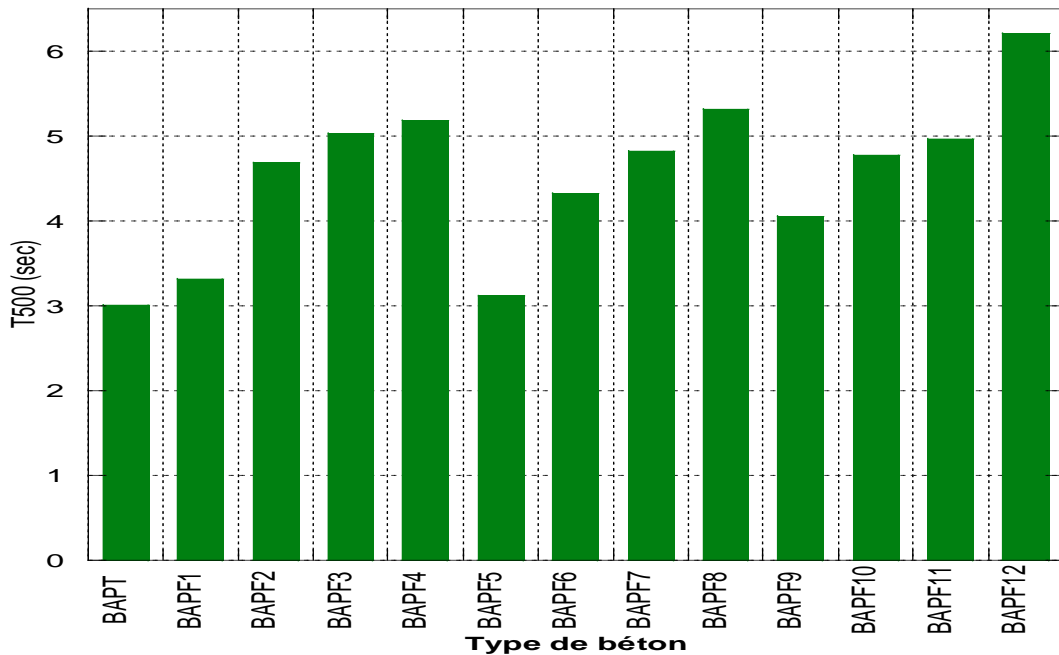
Influence des fibres sur T500.

Fig. VI-53 – Variation du T500 en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.

On peut clairement remarquer que le T500 est d'autant plus élevé que le dosage en fibres augmente et que les fibres sont longues. Pour un BAP renforcé de fibres à un dosage de 1,5 %, une augmentation du T500 d'environ 100 % est enregistrée par rapport au béton témoin. Les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage et en conséquence un temps d'écoulement élevée.

Influence des fibres sur la stabilité au tamis.

Les résultats obtenus par l'essai de stabilité au tamis, marquent une amélioration de la stabilité avec l'incorporation des fibres métalliques. La bonne adhérence entre la pâte et les fibres explique ce comportement avantageux.

Le rôle des fibres longues de 5cm est plus important dans la stabilité de béton à l'état frais. Ce résultat démontre que l'augmentation de la longueur des fibres augmente l'adhérence entre les fibres et la pâte.

Aucun des BAP étudié ne présente un risque de ségrégation statique. En effet la quantité de laitance est située à l'intérieur du domaine exigé (figure VI-54). Pour les BAP étudiés on a relevé une laitance $P < 5\%$, la résistance à la ségrégation est dite « trop importante ». Le mortier est trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

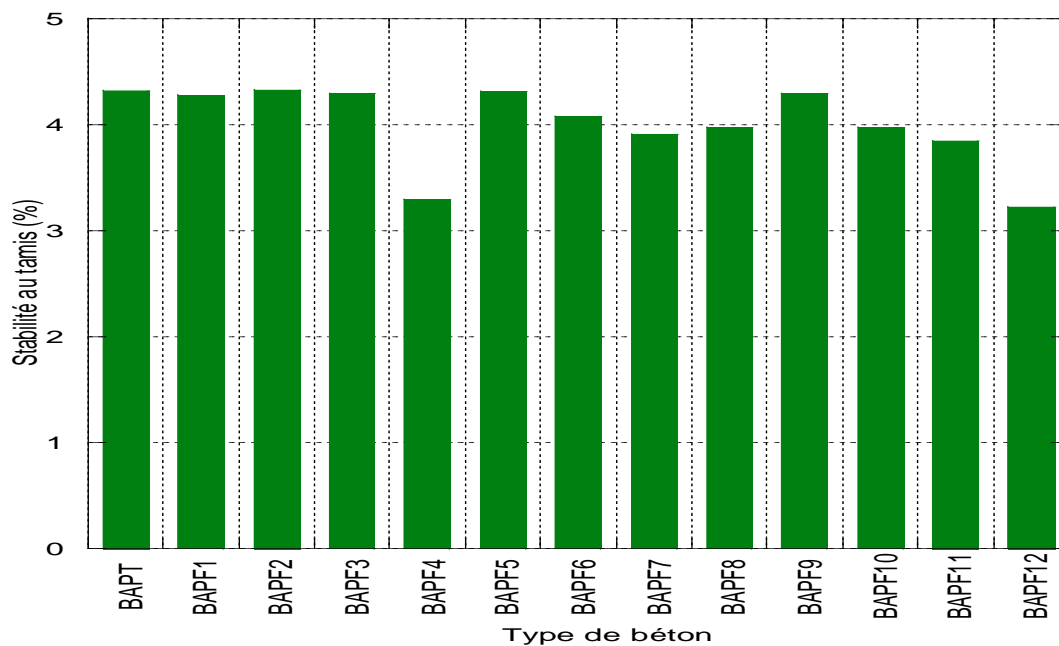


Fig. VI-54 – Variation de la stabilité au tamis en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.

.Influence des fibres sur la boîte en L.

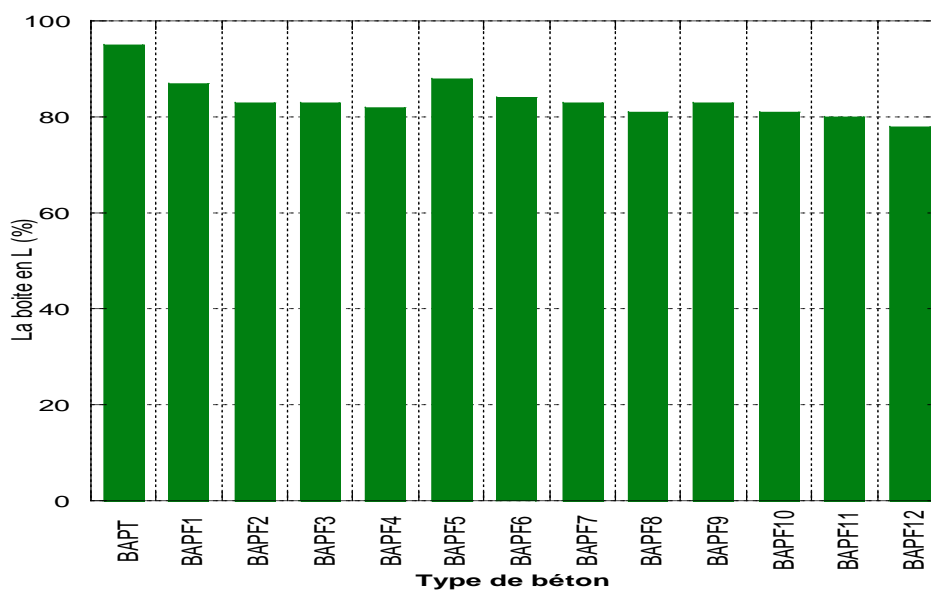


Fig. VI-55 – Variation de la boîte en L en fonction du volume et la longueur des fibres dans les bétons autoplaçants.

Il apparait clairement d’après les résultats obtenus sur l’essai de “La boîte en L” que la grande valeur enregistrée, est au niveau de la composition du BAP témoin et elle diminue avec l’incorporation des fibres.

Les résultats obtenus par l’essai boîte en L sont présentés sur la figure VI-55. Tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s’inscrivent dans le domaine des BAP, excepté le BAPF12 qui donne une valeur de 0,78, alors qu’elle doit être supérieure ou égale à 0,8

[AFGC, 2008], L'augmentation de la longueur des fibres a rendu difficile l'écoulement et a entraîné, un blocage du béton surtout pour le BAPF12. On peut noter aussi pour les BAPF à des dosages optimums de 1 %. Mais Au-delà de cette teneur, on relève une diminution des taux de remplissage

Tableau VI-6 – Résultats des propriétés rhéologiques et mécaniques des BAPF et BAP

	ETA (mm)	T500 (sec)	ST (%)	BL (%)	RT (MPa)			RC (MPa)			VAO (m/sec)	
					7j	28j	90j	7j	28j	90j	56j	90j
BAP T	685	3,01	4,32	0,95	4,75	4,91	5,30	39	45	49	4211	4371
BAPF 1	669	3,31	4,28	0,87	4,85	5,12	5,62	38	47	51	4372	4413
BAPF 2	652	4,69	4,33	0,83	5,09	5,63	5,89	40,2	48	52,7	4403	4489
BAPF 3	648	5,03	4,29	0,83	5,13	5,71	6,08	39,4	47,6	53,8	4419	4496
BAPF 4	601	5,18	3,29	0,82	5,03	5,32	5,94	40	48,3	53,2	4427	4501
BAPF 5	653	3,12	4,31	0,88	5,12	5,33	5,87	37,8	46,9	51,9	4381	4415
BAPF 6	646	4,33	4,08	0,84	5,09	5,47	6,88	40,8	49	53	4407	4488
BAPF 7	631	4,82	3,91	0,83	5,22	5,81	7,18	42,5	51,3	55,2	4449	4521
BAPF 8	597	5,32	3,97	0,81	5,17	5,61	6,85	42	50,6	54,9	4431	4501
BAPF 9	632	4,05	4,29	0,83	4,88	5,29	6,21	41,7	49,8	54	4388	4423
BAPF 10	627	4,78	3,97	0,81	5,03	5,67	6,72	39,68	48,4	52,3	4383	4462
BAPF11	613	4,97	3,85	0,80	5,12	5,59	6,89	39,6	48,2	53,6	4397	4589
BAPF 12	592	6,21	3,22	0,78	5,19	5,71	6,67	40,8	47,3	52,9	4453	4513



Malaxage du béton



Essai d'étalement



Essai de la Boite en L



Essai de la stabilité au tamis

Fig. VI-56 – Essais rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés.



Essai de compression du BAP

Essai de compression du BAPF

Essai de traction par flexion des BAP et BAPF

Fig. VI-57 – Essais mécaniques des BAPF et BAP.

VI.6.4. L'EFFET DES FIBRES SUR LES PROPRIETES MECANIQUES.

Influence des fibres sur la résistance à la compression.

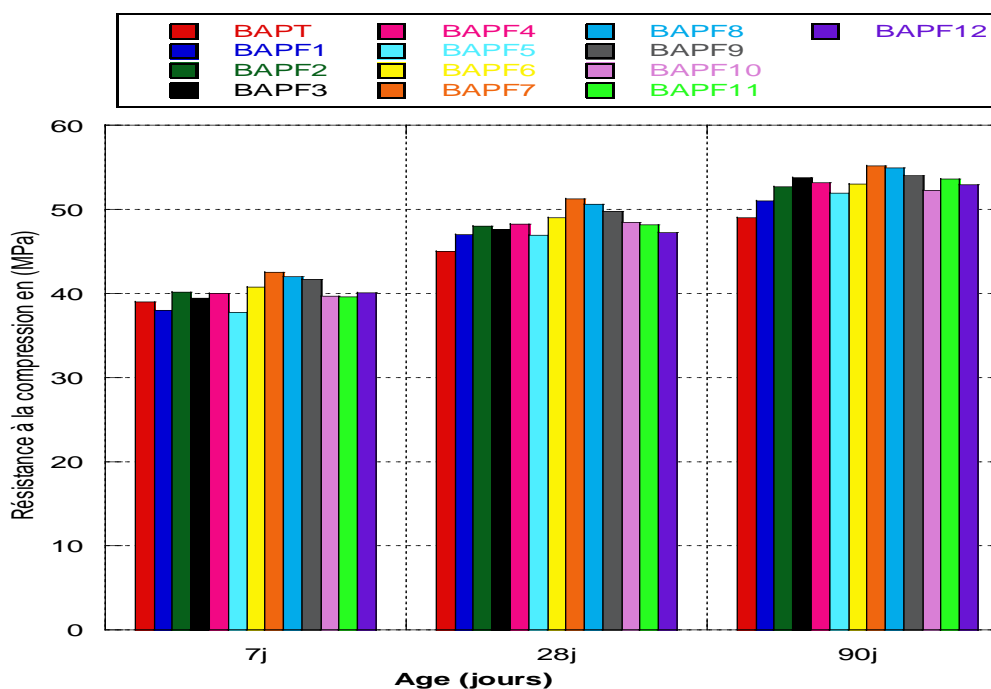


Fig. VI-58 – Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de la durée de conservation.

L'introduction des fibres dans les compositions des BAP n'a permis qu'une augmentation de la résistance à la compression à 7, 28 et 90 jours de l'ordre de 1 à 3 % seulement. On peut remarquer que l'introduction de fibres métallique n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP. Plus précisément la résistance à la compression s'accroît légèrement quand le dosage en fibres longues est plus important. On attribue cette évolution à l'orientation des fibres qui s'oppose à la propagation des fissures. Il a été montré qu'en compression les fibres longues interviennent au niveau des macrofissures obliques et verticales [112]. Ce concours se traduit surtout par une élévation des frottements entre les lèvres des macrofissures, frottements qui peuvent conduire à un gain apparent de résistance à la compression, alors qu'il s'agit d'une amélioration de la capacité portante de l'éprouvette.

Le processus de rupture est montré sur la figure VI-57. La première étape correspond à l'apparition de la fissure résultant de la localisation des déformations. La matrice en béton est rompue mais le bloc est resté en un seul morceau grâce aux fibres qui le retiennent.

Influence des fibres sur la résistance à la traction par flexion.

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³, en utilisant un dispositif de flexion 3 points. Six éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge.

L'introduction des fibres crochetées dans la composition d'un BAP permet une augmentation considérable de sa résistance à la traction par flexion. Sur la figure VI-58, on remarque qu'à 90 jours la résistance à la traction par flexion les bétons BAP7 et BAP11 ont augmenté respectivement de 35 et 30% suite à l'introduction de 1% de fibres dans leurs compositions. Ceci peut s'expliquer par la diminution de la compacité du béton au-delà de ce pourcentage, suite à la présence de cavités engendrées par le non remplissage des zones d'accrochage de fibres.

La composition optimale est celle avec ajout de fibres à 1%, ce pourcentage améliore sensiblement la rigidité et confère une ductilité significative au BAPF par rapport au BAP. Cela a été mis en évidence aussi par Balagura, Gru et Deeb [113, 114, 115].

On remarque que l'ajout de fibres en faible pourcentage apporte une légère augmentation de la résistance à traction par flexion (6 %). Par contre, avec l'augmentation du volume des fibres cette résistance augmente et atteint des résistances variant de 12% à 27% à 28 jours.

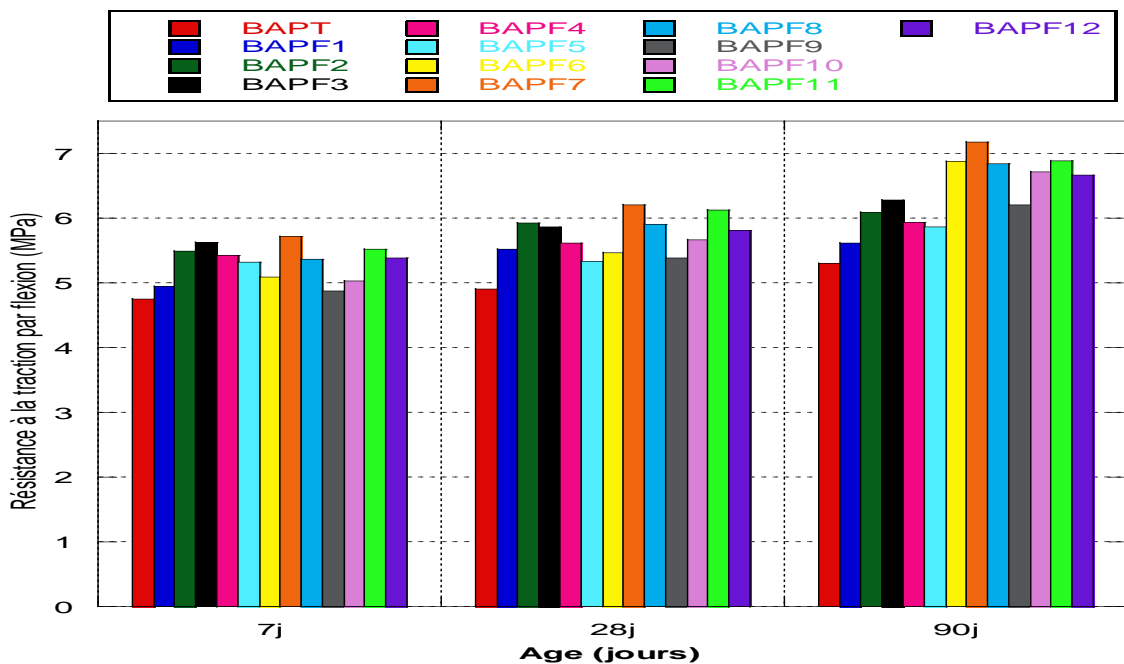


Fig. VI-59 – Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de la durée de conservation.

Influence des fibres sur la vitesse de propagation de l'onde.

L'essai non destructif est un essai qui permet d'évaluer la résistance à la compression.

L'introduction des fibres dans les compositions des BAP n'a permis qu'une légère augmentation ne dépassant pas les 4% de la VPO. On peut remarquer sur la figure VI-60 que l'introduction de fibres métallique à différentes longueurs n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP, et cela est vrai quel que soit l'âge du béton ce qui se répercute sur la vitesse de propagation de l'onde.

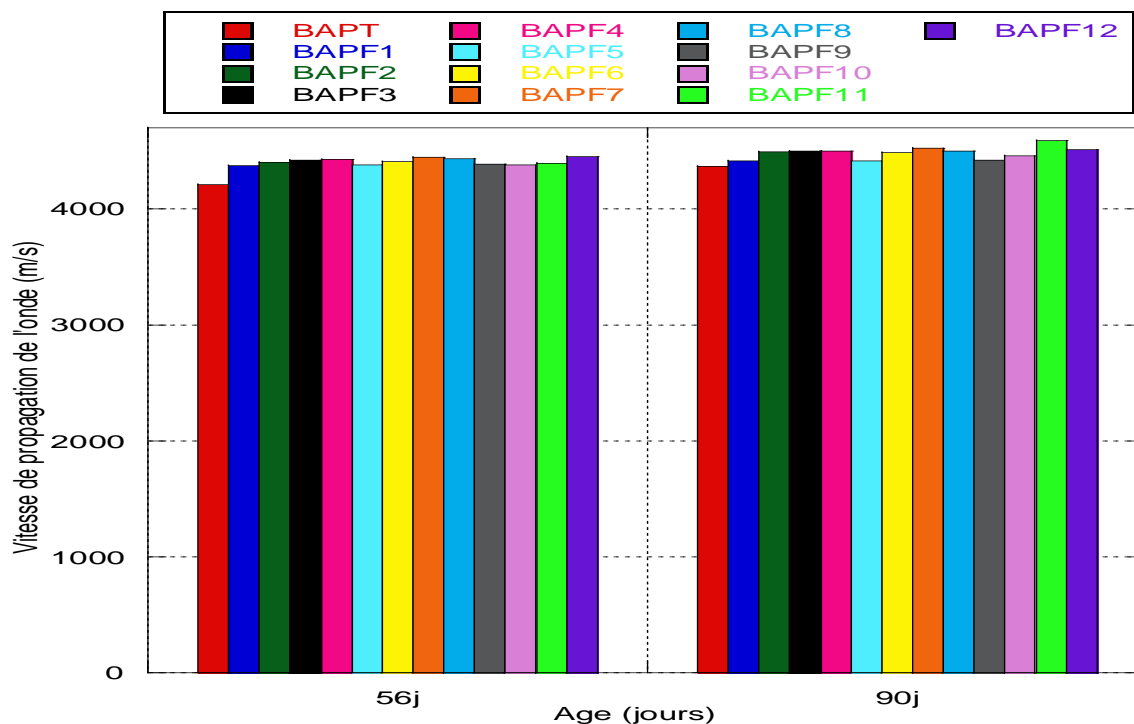


Fig. VI-60 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonique.

CONCLUSION.

Ce premier volet traite l'influence des fillers poudre de marbre et calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants et bétons autoplaçants fibrés à l'état frais et durcis. Les fillers étudiés sont des déchets industriels et qui se différencient par leur surface spécifique Blaine "SSB" notés respectivement "3000", "7000" et "9000". Trente-huit (38) compositions différentes ont été envisagées. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent "SP" qui varie entre 1,5% et 1,75%. La teneur en fines est variable de 60 kg à 120 Kg/m³. Pour améliorer les propriétés des BAP à l'état durci on a incorporé des fibres métalliques dans cette étude.

Les résultats conduits sur les BAP frais en utilisant l'essai d'étalement, T500, stabilité au tamis et L-Box montrent que l'ajout de fillers ayant une grande SSB en association avec un taux élevé en superplastifiant améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné et sa résistance à la ségrégation. Il faut noter qu'il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative.

Pour le filler "PM" un dosage en superplastifiant tel que $SP=1,5\%$ est à l'origine d'une mauvaise mobilité du béton à travers le ferrailage surtout avec une SSB trop élevée. D'autre part, quand $SP>1,75\%$ la fluidité devient très importante et une ségrégation statique est détectée d'où ces compositions sont rejetés par L'AFGC. Par conséquent, un dosage en superplastifiant entre 1,5 et 1,75% conduit à des résultats satisfaisants en termes de mobilité du béton en milieu confiné et d'ouvrabilité.

Pour le filler "FC" un meilleur écoulement du BAP à travers le ferrailage est observé avec l'absence du blocage pour $SP=1,5\%$ cela peut être attribué à l'effet non absorbant au filler calcaire en les comparant au fillers poudre de marbre.

Afin d'améliorer certaines propriétés mécaniques de ces bétons (résistance à la traction, ductilité etc.), des fibres métalliques sont incorporées. Ce renforcement peut influencer le comportement de ces derniers à l'état frais et durci.

On remarque que l'introduction des fibres conduit à une diminution appréciable de l'étalement, à une augmentation du temps d'écoulement et à une diminution du pourcentage de laitance à l'essai au tamis. Ceci s'explique par le rôle de la longueur des fibres dans le mélange :

- l'étalement est diminué parce que les fibres, de part leur élancement, bloquent le système lors de son étalement.

- le temps d'écoulement est considérable, parce que les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage de l'écoulement.

Ce qui est important à mentionner pour l'essai de compression et de traction par flexion, est que le mode de rupture des éprouvettes fibrées a complètement été modifié. Il est passé d'un mode de rupture fragile pour le BAP sans fibres, où l'éprouvette est complètement rompue en deux, à une rupture progressive et ductile où l'éprouvette reste en un seul morceau, difficile à casser. Cela traduit le rôle mécanique de la fibre qui est activé après apparition des fissures, notamment en phase post-pic.

Les résistances à la compression sont proportionnelles aux taux de substitution des granulats par des fillers de poudre de marbre. L'ordre de grandeur des résistances obtenues nous laisse dans la gamme des résistances usuelles des bétons ordinaires. Il est donc important de noter que la gamme des bétons autoplaçants, en matière de résistances mécaniques, est concurrente à celle des bétons ordinaires. Ce constat est valable pour les deux propriétés investiguées, en l'occurrence ; la résistance à la compression et à la traction par flexion.

L'ajout des fibres en faible quantité apporte une légère augmentation de la résistance. Par contre, avec l'augmentation du volume des fibres au-delà de 1% ces caractéristiques mécaniques tendent plutôt à diminuer. Ceci peut s'expliquer par la diminution de la compacité du matériau suite à la présence de zones de chevauchements de fibres (formation d'oursins) qui engendrent des cavités. Le béton avec 0,8% de fibres à 30mm de longueur présente un meilleur comportement en compression et traction par flexion.

CHAPITRE VII – VALORISATION DE L’AJOUT CIMENTAIRE POUVRE DE MARBRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS

VII.1. INTRODUCTION.

Après l’achèvement de la partie expérimentale concernant la valorisation de la poudre de marbre dans les BAP comme ajout et suite aux résultats encourageants de l’exploitation d’un déchet industriel dans le domaine du bâtiment, nous allons aborder dans cette partie la valorisation de ce déchet dans les BAP en visant l’aspect économique et environnemental, dans lequel nous nous intéressons à la détermination du pourcentage optimal de la poudre de marbre en substitution partielle avec le ciment. L’utilisation d’autre type d’ajout à titre de comparaison ou de correction semble très intéressante. La présentation et l’interprétation des résultats d’essais sur bétons frais, bétons durcis au moyen terme (propriétés physico-mécaniques) et à long terme (durabilité) sont indispensables afin de prédire l’effet de ce déchet sur le béton autoplaçant.

Pour l’obtention d’un béton de qualité, c.à.d. de bonnes résistances à la compression et à la traction, l’ajout de fibres semble une solution pour pallier cette faiblesse en conférant une meilleure ductilité. Dans la plupart des cas, les bétons autoplaçants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un seul type de fibre. L’utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes et des dosages appropriés peut potentiellement non seulement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant, mais peut aussi contribuer à un gain conséquent de fibres.

La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation ou mixage est étudiée dans cette partie. Des mélanges mixtes ou hybrides ont été formulés avec des fibres d’acier, de fibres de verre et de polypropylène de différentes longueurs et dosage. L’étude met en évidence l’aspect quantitatif des fibres pour améliorer les performances du composite fibré.

Afin de comprendre l’utilisation et le comportement de ce matériau une recherche sur la microstructure du matériau a été inévitable. Dans un premier temps, nous présenterons rapidement les principales caractéristiques et problématiques liées à ce matériau en se basant sur les résultats tirés de l’expérimentation. Puis, une analyse du comportement des fibres, notamment au niveau de l’interface fibre-matrice au sein de la matrice béton.

VII.2. OPTIMISATION DU RAPPORT E/C ET LE DOSAGE EN SUPERPLASTIFIANT.

Dans l’industrie cimentaire, la recherche d’un liant moins coûteux en utilisant des déchets industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour palier au déficit dans la fabrication du ciment Portland. Cependant malgré les avantages techniques, économiques et écologiques rapportés par l’utilisation des ciments composés, ces derniers restent associés à des inconvénients. Il est donc nécessaire de savoir si des ciments à plusieurs

composants (binaire, ternaire et quaternaire) ont des effets synergiques de façon à ce que leurs ingrédients arrivent à compenser leurs faiblesses mutuelles. L'objectif de notre travail consiste en l'étude des effets de l'incorporation d'ajouts minéraux tels que : Poudre de marbre (ajout inerte), métakaolin (ajout actif) et fumée de silice (ajout très actif) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants élaborés selon des différentes combinaisons à base de ces ajouts. Ceci permettra de sélectionner les dosages optimaux pour les ciments binaires et les couples optimaux pour les ciments ternaires et quaternaires, les plus performants, aussi bien du point de vue rhéologique que du point de vue résistance mécanique.

Afin d'étudier l'influence du dosage en eau et du superplastifiant sur les différentes formulations à base de différents ajouts, on a fait varier la quantité d'eau et du superplastifiant pour arriver à la quantité optimale nécessaire pour garantir le caractère autoplaçant.

Nous avons abouti aux dosages suivants :

E/C = 0,34 et un pourcentage de MEDAFLOW 145 égale à 1,7% du poids du ciment.

Essai de mini cône :

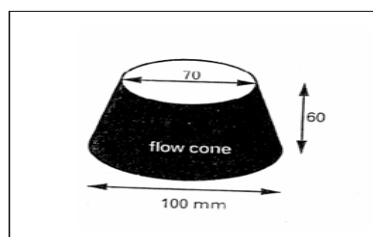


Fig. VII-1 – Cône pour mesurer l'étalement de la pâte du ciment.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau VII-1

Tableau VII-1 – Diamètres de la galette de la pâte de ciment avec ajouts mesurés au mini cône.

N°	Composition	φ30	φ60	φ90	φ120	Observation
01	PM 05	28	28	28	27	
02	PM 10	28	28	28	28	
03	PM 15	29	29	29	29	
04	PM 20	29	30	30	31	
05	PM 25	30	31	30	30	Laitance
06	PM 30	32	32	31	32	Laitance
07	PM10 FS20	26	27	26	27	
08	PM15 FS15	27	26	26	27	
09	PM20 FS10	28	28	29	28	
10	PM25 FS05	29	29	29	29	
11	PM30 FS10	28	29	28	29	
12	PM30 FS15	26	26	26	27	
13	PM 5 FS 5 MK 20	28	27	28	28	Bonne viscosité
14	PM10 FS5 MK 15	28	28	28	28	Bonne viscosité
15	PM15 FS5 MK10	28	28	28	28	Bonne viscosité
16	PM 20 FS 5 MK 5	28	27	29	28	Bonne viscosité
17	PM15FS10 MK20	27	29	28	29	
18	PM20FS10 MK20	26	27	26	27	

D'après le tableau VII-1 on remarque que toutes les pâtes sont fluide (diamètre de galette > 25 cm), au-delà de 25% de poudre de marbre on remarque qu'il ya l'apparition de la

laitance. La pâte perd son ouvrabilité avec l'introduction de la fumée de silice et le métakaolin sous l'effet chimique qui concerne la capacité des additions, caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques en réagissant en présence d'eau avec les constituants anhydres ou hydrates du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment, mais aussi en absorbant de l'eau. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et tient compte de la composition chimique et/ou minéralogique de l'addition et de sa surface spécifique.

VII.3. ETUDE RHEOLOGIQUE DES PATES CIMENTAIRES.

VII.3.1. Étude rhéologique de la pâte cimentaire binaire (ciment + poudre de marbre).

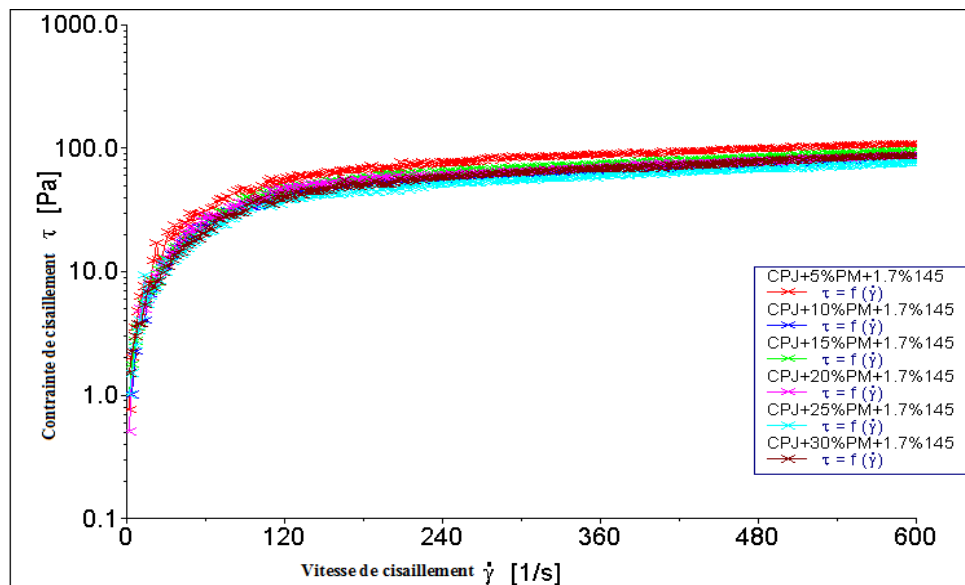


Fig. VII-2 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Binaire.)

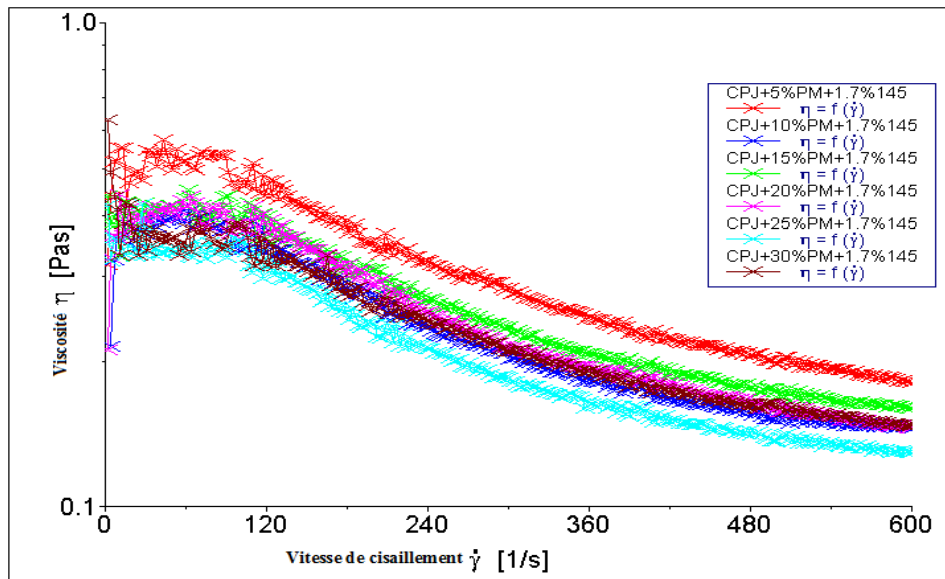


Fig. VII-3 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement avec différents pourcentages de poudre de marbre.

De la Figure VII-2 on constate que la substitution d'une partie du ciment par la PM n'a pas une influence sur la contrainte de cisaillement, ce qui explique que les particules de PM jouent le même rôle que les particules du ciment.

La figure VII-3 montre que plus le pourcentage de la poudre de marbre augmente plus la viscosité de la pâte diminue ; cela peut être expliqué par l'effet dispersant de l'adjuvant qui s'adsorbe à l'interface des grains de l'ajout créant ainsi des forces répulsives entre les particules, réduisant ou éliminant carrément l'adhésion entre les particules voisines (agglomération) ainsi qu'une réduction de la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation.

VII.3.2. Étude rhéologique de la pâte cimentaire ternaire (ciment + poudre de marbre + fumée de silice).

La 2^{ème} série (CPJ+PM+FS+MEDAFLOW145) :

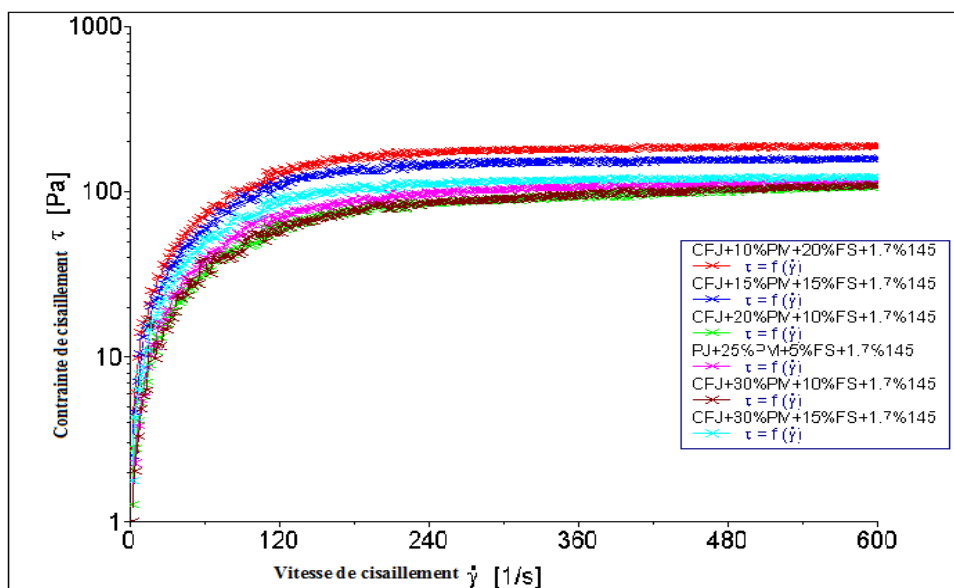


Fig. VII-4 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Ternaire).

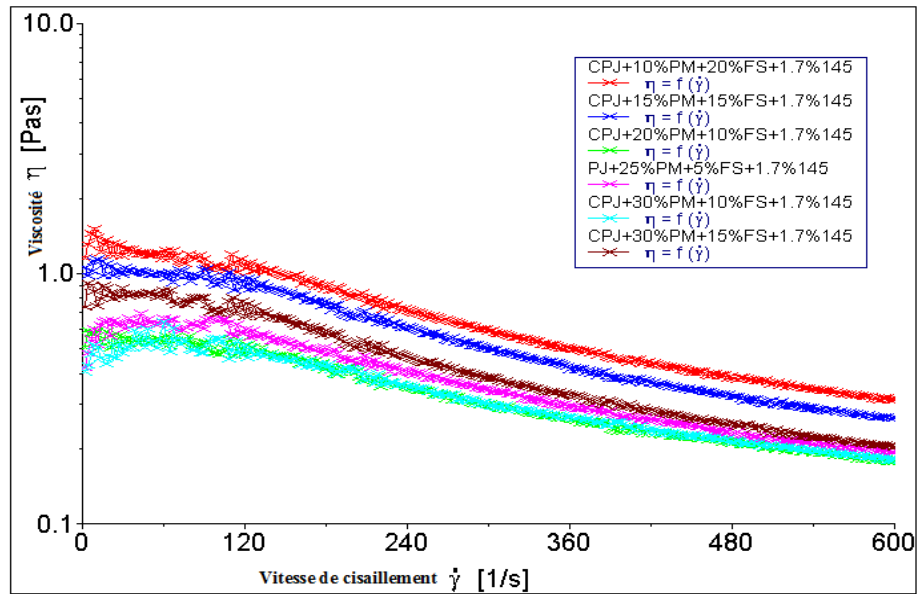


Fig. VII-5 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement (Mélange Ternaire).

Les figures VII- (4 et 5) prouvent clairement que pour les pâtes à combinaison ternaires, les paramètres rhéologiques (contrainte de cisaillement et viscosité plastique) ont diminué avec l'augmentation de l'ajout poudre de marbre et la diminution du % de la fumée de silice cette dernière est caractérisée par l'effet absorbant en donnant des hydrates qui assurent une résistance additionnelle à court et long terme.

VII.3.3. Étude rhéologique de la pâte cimentaire quaternaire (ciment + poudre de marbre + fumée de silice + metakaolin).

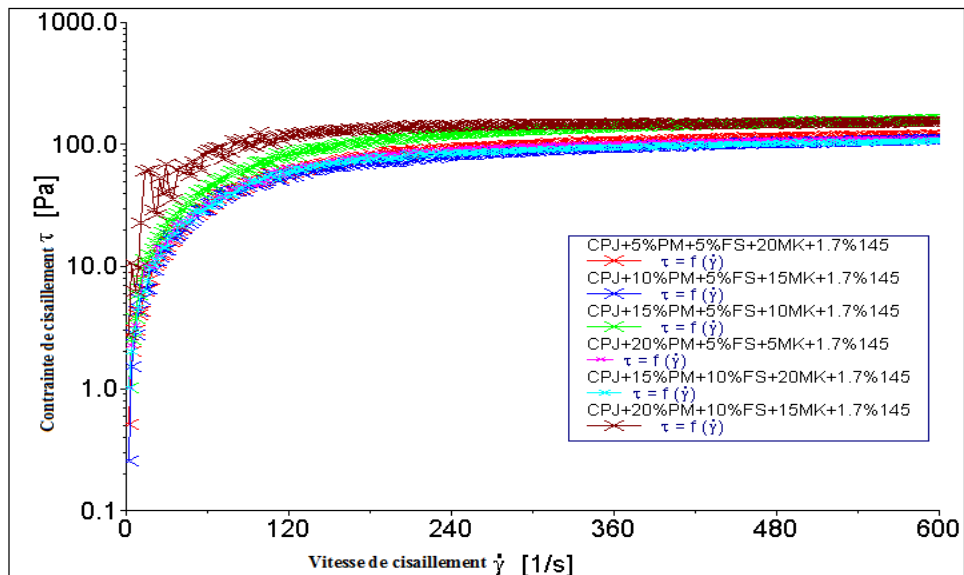


Fig. VII-6 – Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement des pâtes cimentaires (Mélange Quaternaire).

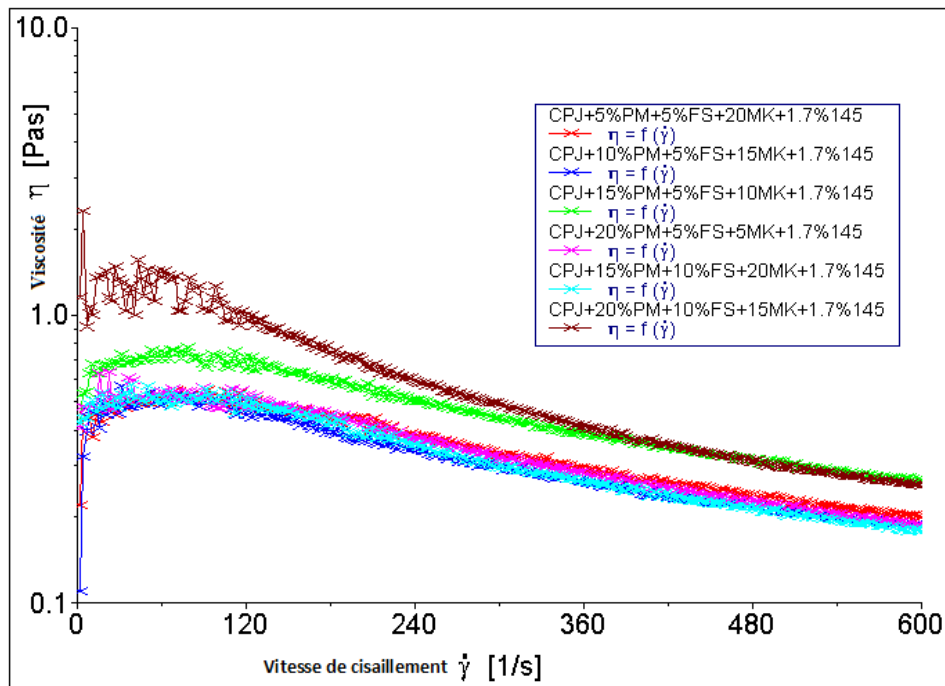


Fig. VII-7 – Viscosité plastique en fonction du taux de cisaillement (Mélange Quaternaire).

De la Figure VII-6 on n'observe qu'un taux de substitution dépassant 40% du poids du ciment à une influence directe sur la contrainte de cisaillement cette dernière qui est influencée par la quantité d'eau absorbée.

De la figure VII-7 on peut conclure que la viscosité augmente avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par les ajouts.

Un taux élevé en additions minérales a une influence directe sur la viscosité.

L'ajout de fumée de silice et du métakaolin a un effet d'épaississement de la pâte qui accroît la viscosité des mélanges. En effet, l'utilisation de la fumée de silice confère au béton une viscosité plus importante [116 ,117].

VII.3.4. Optimisation des constituants pour 1m³ de béton.

Dans le cadre de l'exploitation des ajouts minéraux (poudre de maïs et métakaolin) pour la préparation de BAP économiques, une première série de BAP contenant un ciment binaire ou le pourcentage de la PM varie de 5% à 30%.

Suivant la méthode empirique on a :

$$1\text{m}^3 = 1000 \text{ l} = V_C + V_E + V_{\text{sup}} + V_S + V_G \text{ t.q.} :$$

VC : Volume de ciment en l.

VE : Volume d'eau en l.

Vsup : Volume superplastifiant en l.

VS : Volume de sable en l.

VG : Volume de gravier en l.

On propose un dosage en ciment égal à 500 kg/m³

De la relation E/C = 0.34 on trouve E = 0,34*500=170kg.

Le superplastifiant : masse du sup =1.7% du poids du ciment, 500X1,7/100=8,5kg.

$$V_{\text{sup.p}} = 8,5/1,065 = 7,98 \text{ l}$$

Volume des granulats :

$$V_{\text{Granulats}} = (V_S + V_G) = 1000 - \{V_C + V_E + V_{\text{sup.p}}\} = 1000 - (165,56 + 170 + 7,98)$$

=656,45 Litres

$$V_S = V_G = 50\% \times V_{\text{Granulats}} = 656,45 \times 50/100 = 328,23 \text{ Litre.}$$

$$V_{3/8} = V_{8/15} = 50\% \times V_G = 328,23 \times 50/100 = 164,11 \text{ Litres.}$$

Pour les sables :

Le module de finesse du sable de dune égal à $M_{f2}=1$ et le sable de rivière égal à $M_{f1} = 2.85$.

On suppose que $M_f = 2,3$, $S1 = M_{f1} - M_f = 0,55$ et $S2 = M_f - M_{f2} = 1,3$, et $S1 + S2 = S$. Donc :

$$\text{Sable de rivière} = S2/S = 1,3/1,85 = 70,27\% \rightarrow 230,65 \text{ Litres.}$$

$$\text{Sable de dune} = S1/S = 0,55/1,85 = 29,73\% \rightarrow 97,58 \text{ Litres.}$$

Correction de la teneur d'eau :

L'extrait sec du superplastifiant est égal à 30% donc il y a une quantité d'eau à éliminer, cette quantité égale à : $7.98 \times 70/100 = 5.58$ litres dans chaque m^3 du béton.

La composition retenue est récapitulée dans le tableau suivant :

Tableau VII-2 – Optimisation des constituants pour 1 m³ de béton.

Matière	Volume en l/m ³	Densité	Masse en kg/m ³
Ciment	165,563	3,02	500
Eau	170-5,58	1	170-5,58
Sup.p	7,98122	1,065	8,50
Sable de dune	97,58	2,51	244,93
Sable rivière	230,65	2,54	585,85
Gravier 3/8	164,11	2,60	426,68
Gravier 8/15	164,11	2,40	393,86
Total	1000	---	2324,24

Dans l'ensemble des formulations on a fait varier que les ajouts à des % de substitution ne dépassant pas 45% avec le ciment, suivant le tableau VII-3 :

Tableau VII-3 – Taux de substitution du ciment par les additions minérales.

	% de P.M	% de FS	% de MK
BAP1	05	/	/
BAP2	10	/	/
BAP3	15	/	/
BAP4	20	/	/
BAP5	25	/	/
BAP6	30	/	/
BAP7	10	20	/
BAP8	15	15	/
BAP9	20	10	/
BAP10	25	05	/
BAP11	30	10	/
BAP12	30	15	/
BAP13	05	05	20
BAP14	10	05	15
BAP15	15	05	10
BAP16	20	05	05
BAP17	15	10	20
BAP18	20	10	15

VII.3.5. Effet de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques.

Influence de la poudre de marbre sur l'étalement.

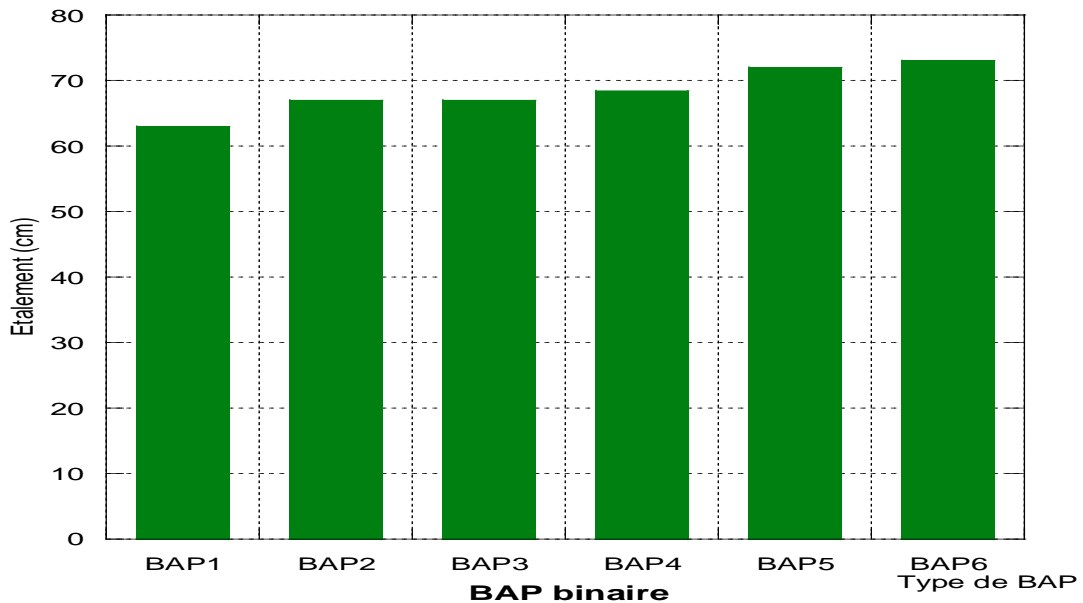


Fig. VII-8 – Effet du taux de poudre de marbre sur l'étalement.

La figure VII-8 montre que les meilleurs étalements sont obtenus pour les BAP qui renferment une quantité de poudre de marbre élevées. Ceci confirme l'action bénéfique du déchet industrielle (PM) vis-à-vis de la fluidité et bien sûr l'effet du superplastifiant utilisés pour minimiser le frottement inter granulaire.

De cette figure, on remarque que l'augmentation du taux de substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une augmentation de la déformabilité du BAP, ce qui se traduit par la croissance du diamètre d'étalement. La meilleure déformabilité a été obtenue avec une teneur en PM de 30%.

Les valeurs obtenues varient entre 63 et 73 cm, ce qui permet de conclure que, toutes les BAP sont à l'intérieur de la fourchette ciblée 60÷80cm [AFGC 2008]. Ces résultats témoignent de l'effet positif de l'utilisation de la PM dans l'objectif d'améliorer la déformabilité des BAP.

L'augmentation de la déformabilité peut être due aussi à la finesse de la poudre de marbre qui est plus grande que celle du ciment. Cette finesse, qui améliore la granulométrie et la compacité, contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons [118, 119]. L'augmentation du volume de la pâte (en raison de la faible densité de la PM par rapport au ciment) permet d'écarter les particules des granulats les uns des autres conduisant à une diminution des frottements intergranulaires [120]. En conséquence, la résistance à l'écoulement devient plus faible, et la déformabilité devient plus grande. L'augmentation du volume de la pâte contribue non seulement à l'amélioration de la déformabilité, mais aussi l'ouvrabilité, la plasticité et l'homogénéité des BAP [121]. La substitution du ciment par de la poudre de marbre conduit à une diminution de la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation, ce qui résulte une quantité d'eau libre plus grande, raison pour laquelle la déformabilité augmente.

Influence de la poudre de marbre sur la stabilité au tamis.

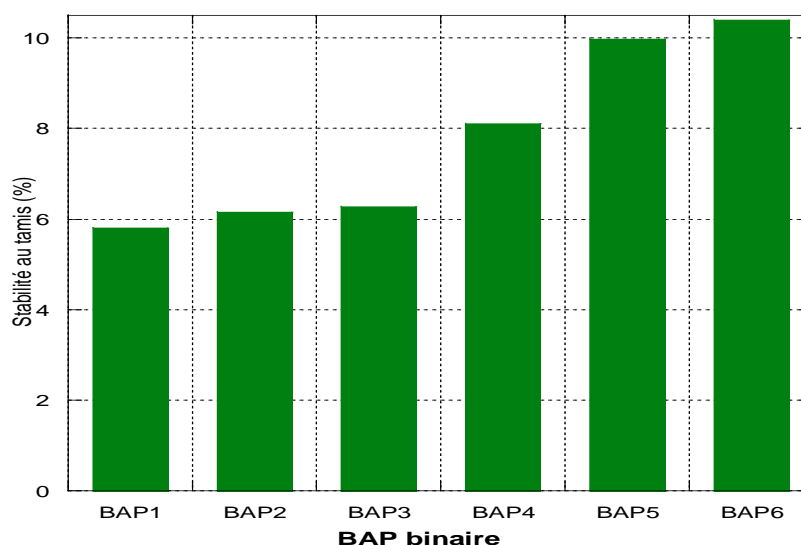


Fig. VII-9 – Effet du taux de poudre de marbre sur la stabilité au tamis.

La figure VII-9 dévoile que, l'augmentation de la teneur en PM mène à une augmentation de l'indice de ségrégation. Les valeurs obtenues varient de 5,8 à 10,4 %. Ces valeurs indiquent que, des résultats trouvés on peut conclure que toutes les compositions testées ont une résistance satisfaisante synonyme d'une stabilité correcte comme souligne [122].

On remarque aussi que l'accroissement de la teneur en PM conduit à une diminution de la résistance à la ségrégation. Ce résultat s'explique du fait que les grains de l'addition minérale PM améliorent la granulométrie et la compacité des BAP, ce qui peut donner une stabilité accrue.

La faible valeur de l'indice de ségrégation du mélange à 5% de PM est due à sa viscosité élevée contrairement au mélange 30% PM que son indice de ségrégation élevé est attribué à sa faible viscosité. L'augmentation de l'indice de ségrégation des autres mélanges est expliquée par la diminution de leur viscosité [123].

Influence de la poudre de marbre sur la boîte en L.

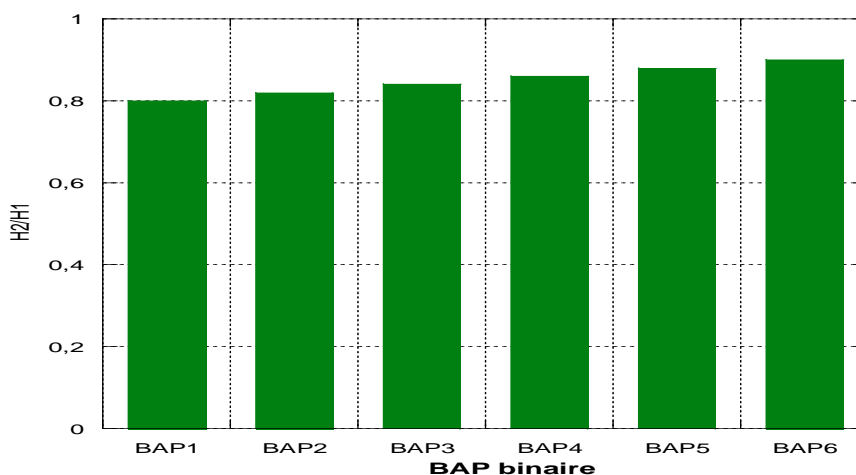


Fig. VII-10 – Effet du taux de poudre de marbre sur H_2/H_1 .

La figure VII-10 illustre la variation du taux de remplissage. Ce taux doit être entre 0,8 et 1 pour éviter le risque de blocage du BAP [AFGC 2008]. D'après les valeurs obtenues, on remarque que tous les mélanges sont à l'intérieur de la plage ciblée. Topcu et al. [99] ont trouvé des résultats presque similaires. Ces auteurs ont rapporté que la substitution du ciment par la PM de 50 kg à 200 kg conduit à des valeurs de taux de remplissage comprises entre 0,8 et 1. Au-delà de 200 kg, les valeurs obtenues sont inférieures à 0,8.

VII.3.6. Influence de la poudre de marbre sur la masse volumique.

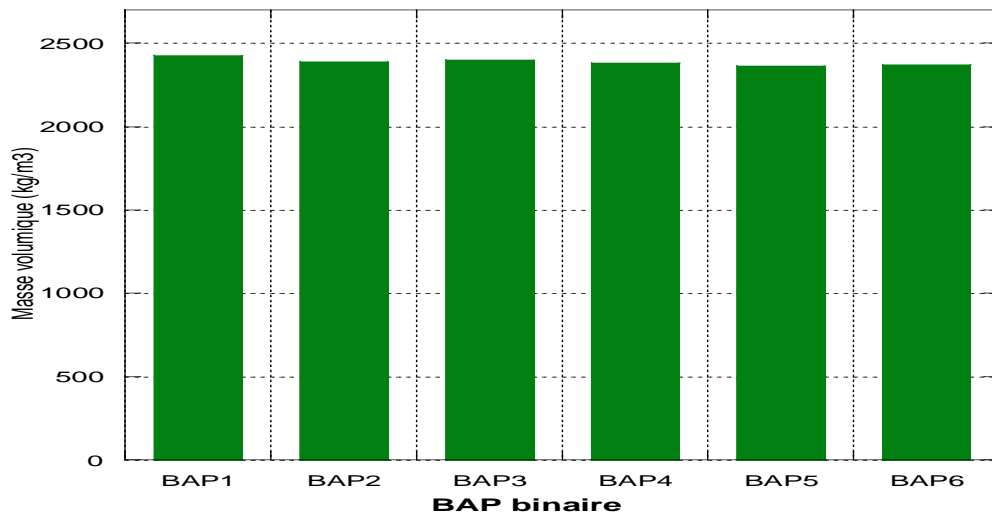


Fig. VII-11 – Effet du taux de poudre de marbre sur la masse volumique à l'état frais.

D'après la figure VII-11 on remarque que la poudre de marbre qui est un filler intervient par sa finesse et s'insère dans les petits vides entre les grains fins de sable, de gravier et du ciment, il en résulte une meilleure compacité ; ce qui justifie l'augmentation de la masse volumique. On peut dire qu'il y a une proportionnalité entre la masse volumique et le % d'ajout, cette proportionnalité peut être expliquée par l'effet de l'arrangement des micros grains qui s'infiltreront dans les micros vides en augmentant la fermeté du béton donc on peut prouver que l'effet granulaire, conditionné par une finesse de mouture élevée par rapport à celle du ciment explique ce phénomène et bien sûr par l'intermédiaire du superplastifiant qui assure une meilleure mobilité.

VII.3.7. Influence de la poudre de marbre sur air occlus.

De la figure VII-12 on constate une diminution de l'air occlus avec l'augmentation du % de la poudre de marbre. Cette augmentation est probablement liée à la meilleure compacité engendrée par les particules fines de la PM.

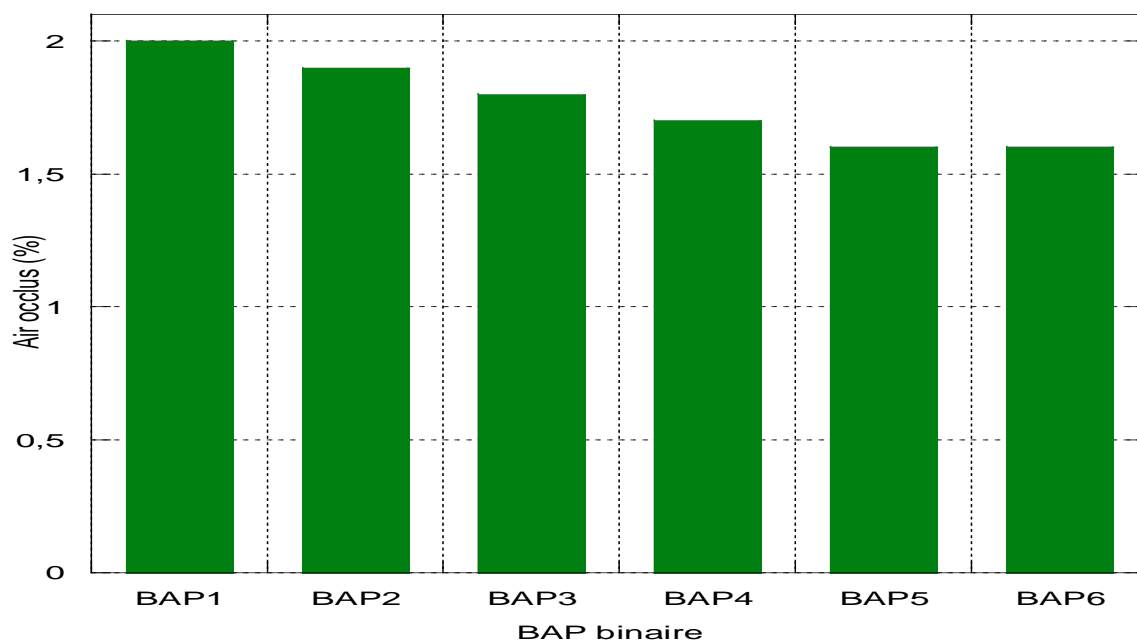


Fig. VII-12 – Effet du taux de poudre de marbre sur l'air occlus.

VII.4. EFFET DE LA POUDRE DE MARBRE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES.

VII.4.1. Effet de la poudre de marbre sur la résistance à la compression.

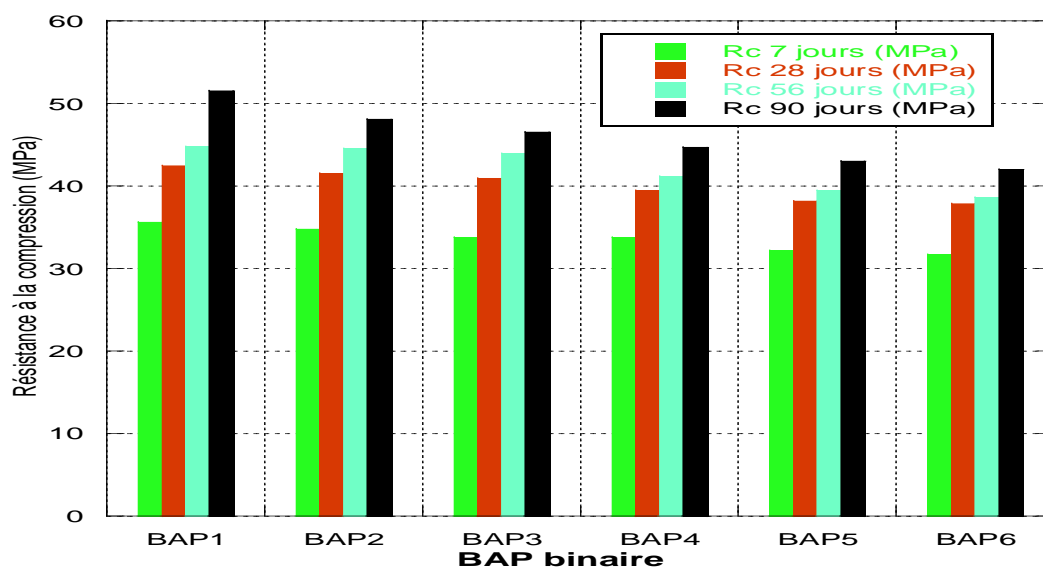


Fig. VII-13 – Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la compression à différents âges.

De la figure VII-13 on constate que la résistance à la compression augmente à fur et à mesure que l'âge augmente et elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de PM incorporé. Pour un pourcentage de 30% de PM incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 81% de la résistance du BAP avec 5% de PM, ceci est dû à la nature de la PM qui appartient à la famille des fillers quasi inertes [124, 125, 126]. Ces fillers sont composées principalement de CaCO_3 . Cet élément accélère l'hydratation du C_3S , ce qui améliore les résistances aux jeunes âges [127, 128]. Néanmoins, l'effet associé de ces fillers

est la réduction du potentiel pouzzolanique qui cause la diminution des résistances à long terme [129]. Autrement dit que, si le filler PM accélère l'hydratation des BAP au jeune âge, son effet a tendance à se stabiliser à long terme [130, 131] ; de plus, l'augmentation du dosage en filler ne semble pas avoir une influence significative sur le développement des résistances.

Topçu et al. [99] ont testé des BAP comportant la PM. Ces auteurs ont montré que la substitution du ciment par de la PM conduit à une diminution de la résistance à la compression, ce qui est en conformité avec nos résultats. Les mêmes auteurs ont trouvé des résistances, à 28 jours, qui varient entre 30 et 60 MPa.

VII.4.2. Effet de la poudre de marbre sur la résistance à la traction par flexion.

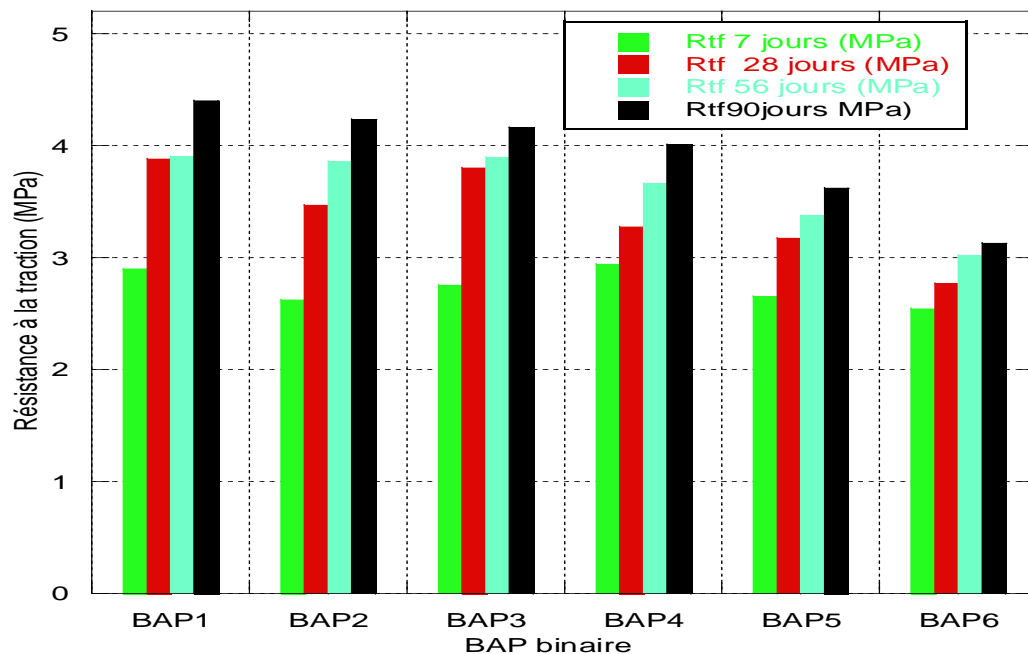


Fig. VII-14 – Influence du dosage en addition PM sur la résistance à la traction par flexion à différents âges.

On constate que la résistance à la traction par flexion évolue similairement que la résistance à la compression. Donc la résistance à la traction par flexion diminue avec l'augmentation du taux de la poudre de marbre et elle a tendance à se stabilisée à long terme.

VII.5. CARACTERISATION DES BETONS AUTOPLAÇANTS AVEC DES CIMENTS BINAIRE TERNAIRE ET QUATERNAIRE.

La poudre de marbre a montré qu'elle présente une certaine activité physico-chimique, qui favorise l'accélération de l'hydratation du ciment par la création de sites de nucléation hétérogène, notamment lorsque elle est finement broyée. Néanmoins, l'effet n'est remarquable que seulement au jeune âge. La poudre de marbre réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés, qui sont favorables à la durabilité du matériau [132]. À long terme, les fillers PM peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique [133].

Pour y remédier à cette stabilité à long terme on fait appelle à quelque ajouts minéraux tel que la fumée de silice et le métakaolin qui sont des ajouts minéraux actifs dont le but d'avoir un bétons autoplaçant qui présentent de bonne propriétés mécaniques à court et long terme. La compositions choisies comme référence est celle du BAP6 suites aux résultats

trouvés sur le plan économique, rhéologique ainsi que mécanique, sachant que le but principal de cette investigation est d'avoir un BAP qui est caractérisé par l'autoplaçance en premier lieu, en deuxième lieu des propriétés à l'état durcis comparable aux bétons conventionnels et en troisième lieu un béton économique et bien sûr écologique.

VII.5.1. Effet des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur les propriétés rhéologiques.

Plusieurs formulations ont été élaborées à partir d'une composition de référence qui est le BAP6 avec 30% de poudre de marbre. L'ajout des fines minérales (poudre de marbre, métakaolin, fumée de silice) est réalisé par substitution partielle du ciment dont le dosage est maintenu constant.

VII.5.2. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la masse volumique.

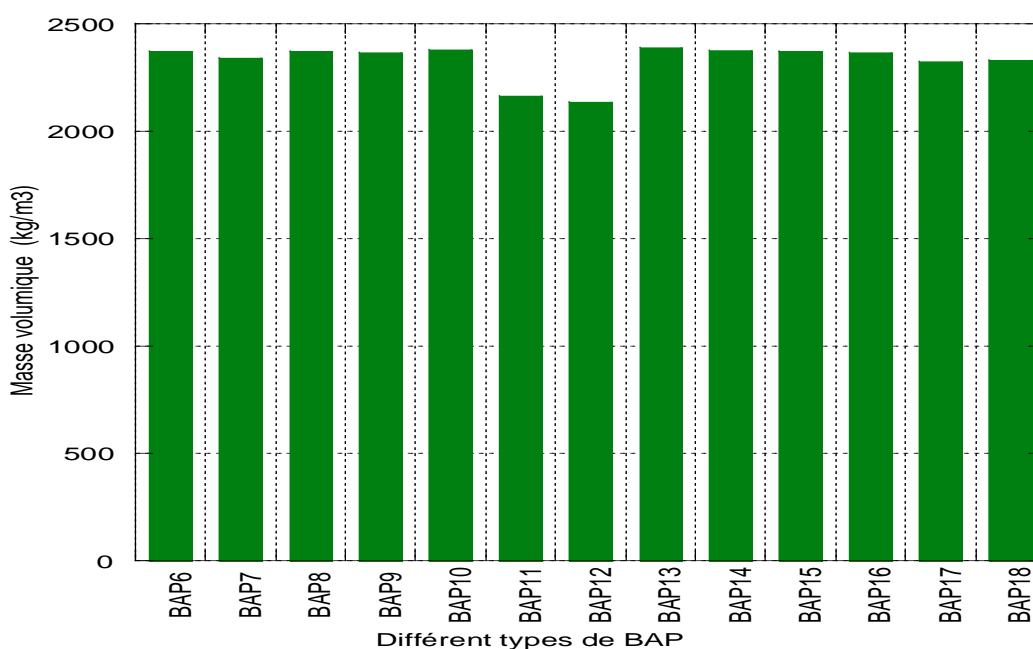


Fig. VII-15 – Effet du type de ciment sur la masse volumique.

La masse volumique des différents BAP est presque similaire dans l'ensemble des BAP avec une substitution partielle de 30% du ciment par les différents ajouts, mais en dépassant ce pourcentage la masse volumique diminue (BAP11 et BAP12) ceci peut être attribué à la faute d'une mauvaise dispersion entraînant une agglomération des grains d'où les particules fines ne s'intercalent pas entre les interstices des grains de ciment ou elles ne remplissent pas le volume des vides.

VII.5.3. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur l'étalement.

Nous remarquons que la poudre de marbre semble avoir une faible influence sur la demande en eau, et peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange cimentaire.

Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à dosages élevés dans la formulation des BAP. Nous avons constaté également que pour un volume de pâte constant, l'ajout de poudre de marbre contribue à diminuer la viscosité du BAP et augmenter son diamètre d'étalement.

De la figure VII-19, il est bien visible qu'une diminution de l'ouvrabilité est remarquée par l'introduction de la fumée de silice et du métakaolin.

Pour la fumée de silice, on peut attribuer cette diminution à sa surface spécifique de Blaine qui est accrue. En effet, plusieurs auteurs rapportent que la fumée de silice a une demande en eau plus importante que celle du ciment, ce qui se traduit par une réduction des propriétés rhéologiques [134]. Le même phénomène a été observé pour les BAP à base d'additions minérales combinées avec la fumée de silice, où on note une perte d'étalement.

Pour l'adjonction du métakaolin comme troisième substituant une amélioration de la fluidité est remarquée mais à un taux de fines ne dépassant pas les 30%, au-delà la fluidité devient sensible et l'étalement diminue.

La grande finesse ($\pm 6000\text{cm}^2/\text{g}$) des PM ainsi que leur non réactivité lors de l'hydratation tendent à améliorer beaucoup plus la fluidité. En revanche, tout excès des additions minérales par rapport à la quantité nécessaire pour combler les vides inters granulaires peut affecter la fluidité.

En effet, on considère que le mortier atteint sa compacité maximale lorsque le dosage critique en filler est atteint [135] ; au-delà de ce dosage les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

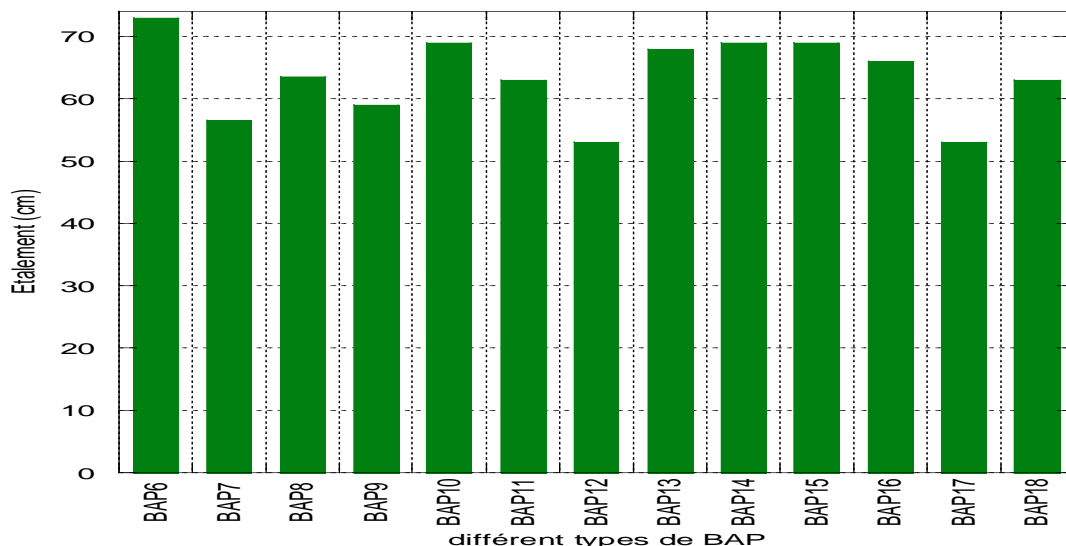


Fig. VII-16 – Effet du type de ciment sur l'étalement.

VII.5.4. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la stabilité au tamis.

Les résultats présentés sur la figure VII-20 montrent que plus le taux de fines est élevée plus le taux de laitance est faible (voir BAP 12, BAP17) mais tout dépend de la nature de l'addition minérale.

L'influence de la fumée de silice sur le comportement rhéologique ne fait pas l'unanimité des résultats trouvés et même des auteurs. Des études [115, 116], ont montré que la fumée de silice augmente le seuil de cisaillement et la viscosité, en augmentant la compacité des mélanges. Tandis que [116] rapportent que l'ajout de la fumée de silice ne modifie pas la

viscosité. D'autres études réalisées par [117] révèlent une demande en eau et en superplastifiant plus importante, due à l'utilisation de la fumée de silice par comparaison avec un mélange de référence.

Pour le métakaolin Samara et al. [118, 119] ont trouvés que l'utilisation du MK dans les pâtes cimentaires à réduit considérablement la fluidité même en présence d'un superplastifiant. Le plus important à mentionner est que la faible valeur de laitance mesurée pour les BAP (11, 12, 17 et 18) est due en fait au manque de pâte dans le Béton qui peut rester collée aux granulats, ce qui introduit alors un biais (sous-estimation) de la mesure.

En effet, on peut admettre une mesure biaisée car lors de la mise au repos des 10 litres de BAP au moment de la réalisation de l'essai de stabilité au tamis, après 15 minutes d'attente, une pellicule d'eau claire est apparue à la surface du béton signe révélateur de ressuage ; de plus, un dépôt de granulats au fond du seau dû à une ségrégation statique du béton a été observé.

L'emploi des additions a permis d'absorber l'eau de ressuage en augmentant le volume de pâte. Cependant, l'augmentation du dosage en addition a réduit la stabilité des BAP (11, 12, 17 et 18), sans être critique. On note toutefois un dosage optimal d'addition de l'ordre de 45%, au-delà duquel la stabilité accroît par augmentation de concentration volumique en solides dans la pâte, le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis.

Plus important, mais leur stabilité reste dans le domaine acceptable des BAP. Combinés avec de la fumée de silice, ces mêmes mélanges présentent des pourcentages de laitance assez faibles et par conséquent une meilleure stabilité. Cette amélioration de la stabilité n'est pas due au faible volume de pâte mais vraisemblablement à la forte demande en eau de la fumée de silice.

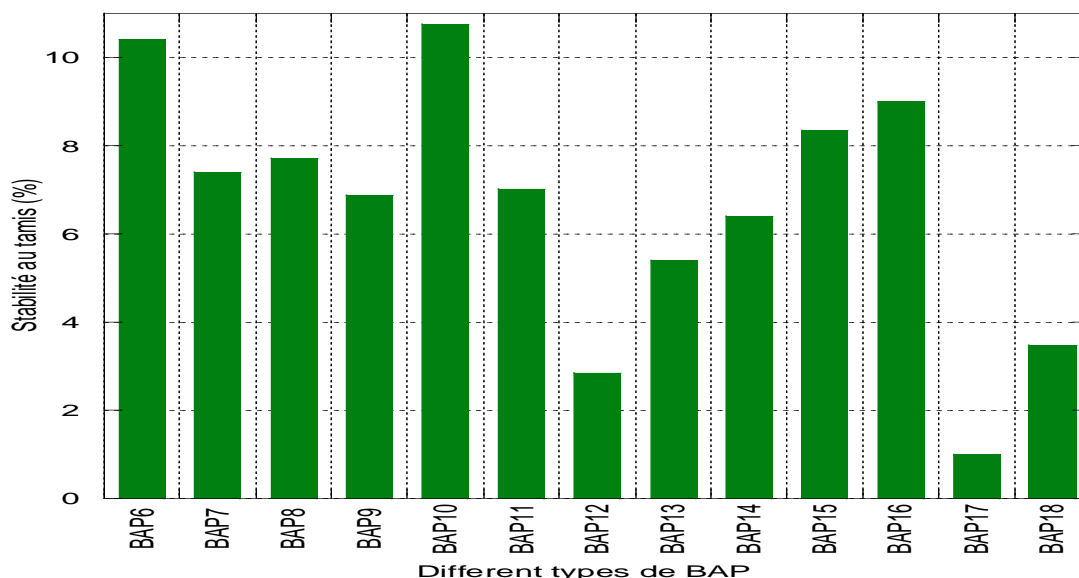


Fig. VII-17 – Effet du type de ciment sur la stabilité des BAP.

VII.5.5. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur air occlus.

Avec un appareillage spécifique, l'aéromètre, la teneur en air des bétons est déterminée selon la norme NF P 18-353. Le principe est de remplir un volume déterminé de béton, de

mettre en pression le récipient hermétiquement clos situe au-dessus, mettre en contact les deux récipients et on accède directement à la valeur de la teneur en air occlus.

La figure IV-18 montre que la substitution de la poudre de marbre par la fumée de silice et le métakaolin n'a pas une très grande influence sur l'air occlus ou sa valeur est toujours inférieure à 5 %.

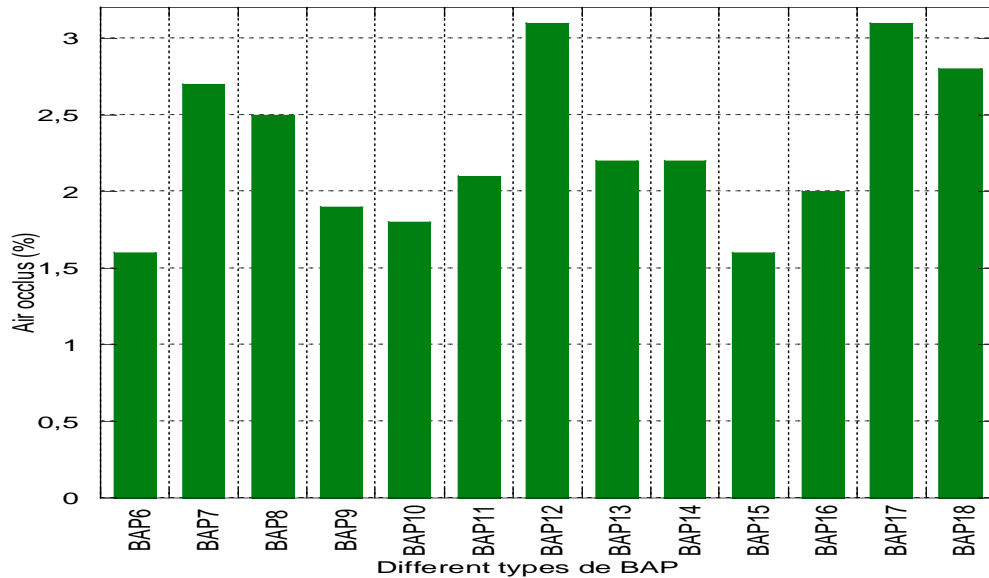


Fig. VII-18 – Effet du type de ciment sur l'air occlus des BAP.

VII.5.6. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la boîte en L.

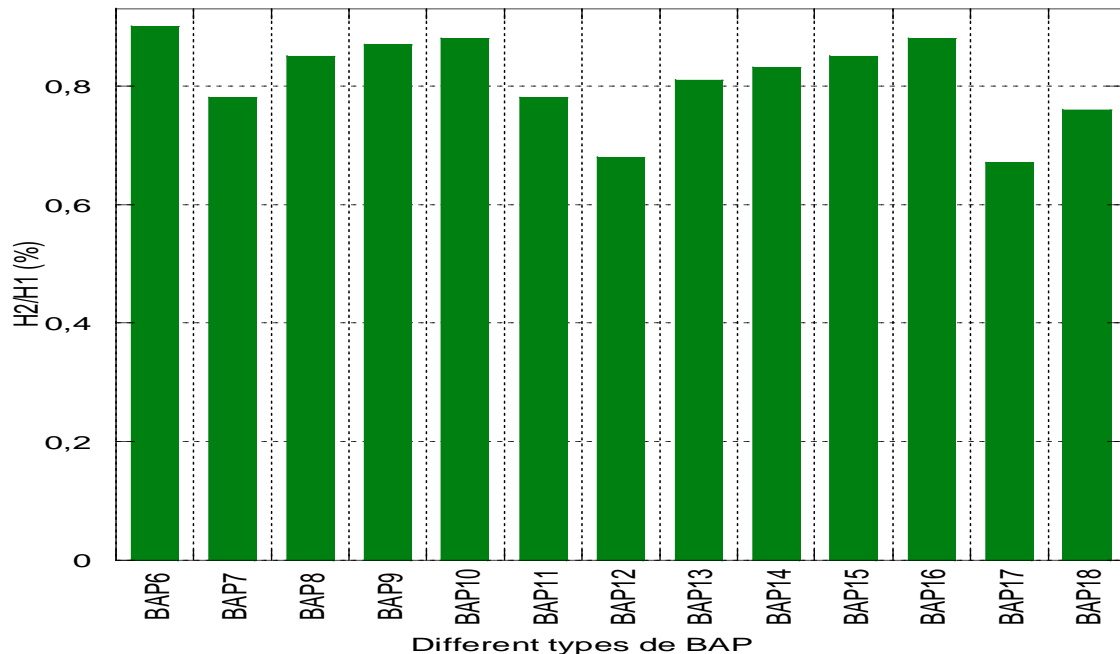


Fig. VII-19 – Effet du type de ciment sur H2/H1 des BAP.

La plupart des BAP donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des bétons autoplaçants ($H2/H1 = 0,8$) selon la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 10), excepté les BAP (7, 11, 12, 17 et 18) qui donnent une valeur du taux de remplissage de 0,78, 0,78,

0,68, 0,67 et 0,76 respectivement. On peut noter que l'augmentation du pourcentage d'ajout a engendré une augmentation de la capacité de remplissage des BAP et que les BAP avec un pourcentage d'ajout dépassant les 30% possèdent un rapport H_2/H_1 inférieur à 0,8.

En effet, pour le BAP avec un taux élevé en poudre de marbre et fumée de silice (BAP 12) un taux de remplissage plus faible, aggravé par une demande en eau supplémentaire de la fumée de silice qui engendrent une viscosité importante, rendant la mobilité du béton difficile en milieu confiné ; de ce fait, le passage de ce dernier à travers la grille est interrompu après un taux de remplissage de 65%.

Cependant, dans certains cas, l'ajout de fumée de silice améliore la capacité de remplissage des mélanges, on constate que le BAP17 à base de fumée de silice et de métakaolin combinés à la poudre de marbre présente un mauvais remplissage en boîte en L, dû à une diminution de la résistance à la ségrégation et une apparition du ressuage. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide à travers un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres ; si le béton a une faible résistance au cisaillement (AFGC, 08). Néanmoins, dans le cas du BAP7, l'ajout de fumée de silice réduit légèrement la capacité de remplissage du béton malgré sa finesse élevée.

VII.6. EFFET DES CIMENTS BINAIRE, TERNAIRE ET QUATERNAIRE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES.

VII.6.1. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la résistance à la compression.

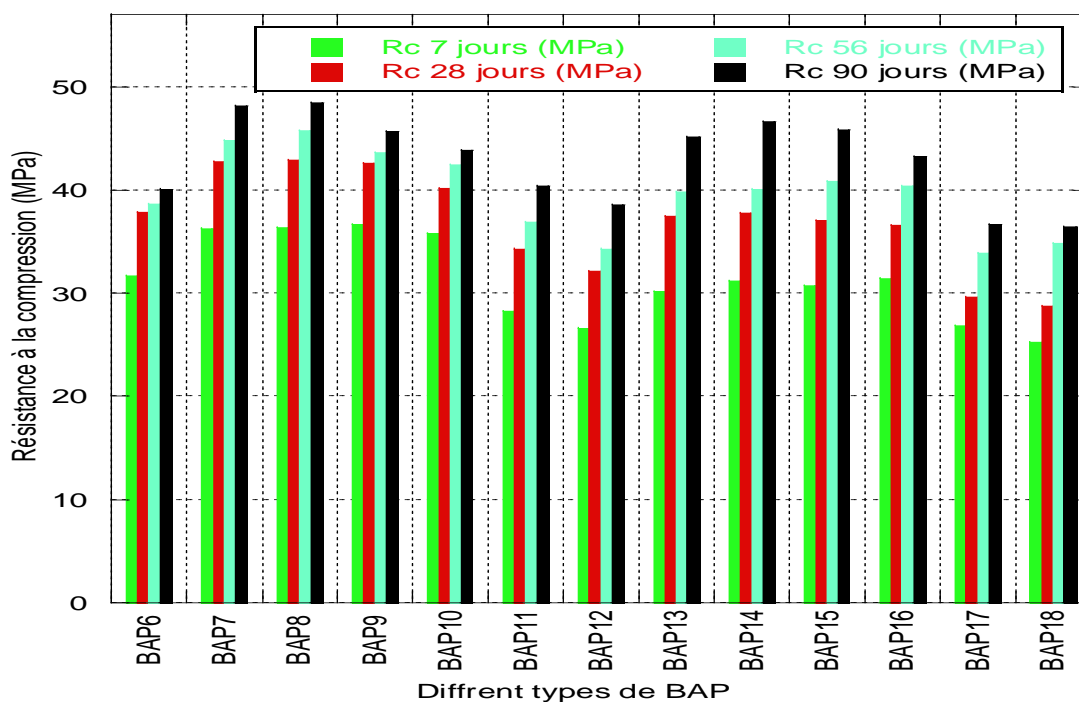


Fig. VII-20 – Effet du type de ciment sur la résistance à la compression des BAP.

L'introduction des additions minérales en combinaison avec la poudre de marbre entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au béton de référence (BAP6) pour

tous les dosages et pour toutes les échéances ou le % d'ajout ne dépasse pas les 30 % d'ajout. Dès 7 jours (figure VII-19), les meilleures résistances sont obtenues par le BAP ternaire avec fumée de silice. Cependant, à plus longues échéances, à 28 jours et au-delà (figure 99), le BAP ternaire avec métakaolin montre de bien meilleures performances mécaniques suivies par le BAP binaire avec poudre de marbre. Alors que l'accroissement des résistances du BAP binaire commence à se stabiliser à partir de 28 jours.

Les additions minérales améliorent les résistances mécaniques par effet de remplissage, par effet de surface et par effet pouzzolanique lorsqu'elles sont réactives. Le métakaolin améliore les résistances à plus longues échéances par effet chimique (pouzzolanique), l'augmentation du dosage en addition au-delà de 30% entraîne une diminution des résistances mécaniques à tous les âges.

Ce phénomène est dû à l'effet du taux élevé de fine particules qui absorbe l'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment qui améliore la compacité et à l'effet de surface mais qui entraîne une mauvaise hydratation du ciment au jeune âge. L'union d'un rapport E/L faible et un taux de fines très grand rend l'hydratation des grains du ciment lente car la quantité d'eau introduite est inférieure généralement à la quantité d'eau nécessaire et la diminution de la fluidité et augmentation de la viscosité suite à la finesse élevée.

De ce fait une partie du ciment ne s'hydrate pas et joue le rôle de fillers initialement. A long terme, avec un apport d'eau, l'hydratation se poursuit de manière plus ou moins importante et moins rapide. En général, cette hydratation additionnelle entraîne une augmentation de la résistance à la compression.

Les gains de résistance des BAP avec addition de fumée de silice et de métakaolin, notamment à partir de 28 jours de durcissement, correspondent à l'accroissement des résistances par effet pouzzolanique. En effet, les analyses aux rayons X de la fumée de silice et du métakaolin (chapitre V) ont montré des matériaux essentiellement vitreux. Par ailleurs, les résistances en compression des BAP avec addition de fumée de silice et métakaolin sont supérieures à celle du béton avec poudre de marbre.

VII.6.2. Influence des ciments binaire, ternaire et quaternaire sur la résistance à la traction par flexion.

La tendance de l'évolution des résistances à la traction par flexion est similaire à celle des résistances à la compression.

Toutes les additions minérales assurent des résultats encourageants, du fait que les bétons qui incorporent les additions en combinaison avec la poudre de marbre présentent de bien meilleures résistances que celles développées par le béton autoplaçant avec 30% d'ajout de poudre de marbre.

Au jeune âge, les BAP ternaire et quaternaire présentent les meilleures résistances ; cependant, à long terme, ce sont les additions potentiellement réactives qui assurent le développement des résistances par effet pouzzolanique pour la fumée de silice et le métakaolin. On notera aussi l'effet favorable de la combinaison entre fumée de silice et la poudre de marbre et entre la poudre de marbre, fumée de silice et métakaolin.

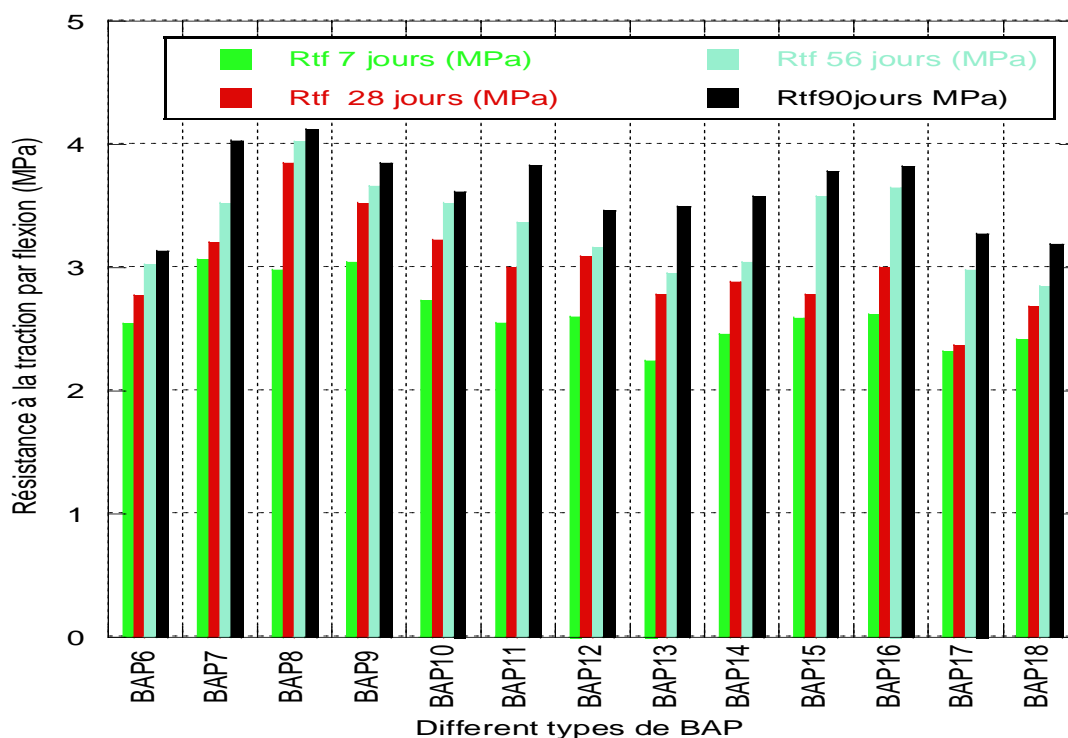


Fig. VII-21 – Effet du type de ciment sur la résistance à la traction par flexion des BAP.

VII.7. RETRAIT.

Étant donné le nombre important d'échantillons à étudier et les différents paramètres à exploiter, il nous a été difficile de réaliser l'ensemble des essais de retrait sur la totalité de nos mélanges.

Il faut rappeler que l'essai de retrait a été réalisé au sein du laboratoire CETIM de Boumerdès. Cette campagne expérimentale a nécessité l'acheminement des différents corps d'épreuve du CNERIB vers CETIM.

Afin de remédier à ces contraintes logistiques, nous avons jugé utile d'opter pour une optimisation des mélanges. En effet, l'étude a porté sur 18 formulations visant l'effet de la poudre de marbre sur les BAP et son effet en combinaison avec la fumée de silice et le métakaolin, le paramètre mis en jeu est le ciment binaire, ternaire et quaternaire. Le dosage de l'addition a été préalablement fixé à 30% et 45 % du poids du ciment.

Dans notre cas, le retrait est mesuré dans des conditions de température ambiante et d'hygrométrie normalisées respectivement $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et 45% à 55%. Le retrait est calculé suivant la formule : $r = \frac{\Delta l}{l} * 1000$ les résultats sont présentés dans les figures VII (21, 22 et 23).

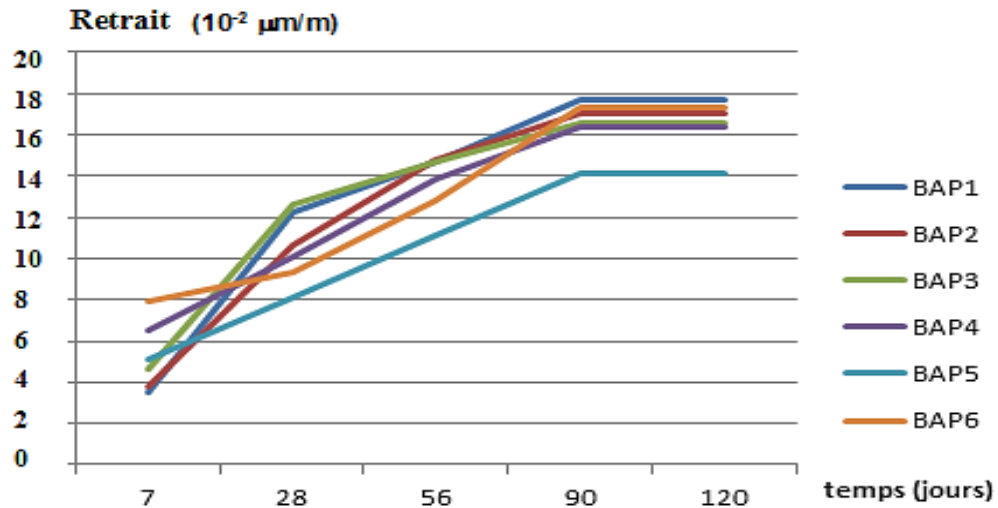


Fig. VII-22 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP binaires

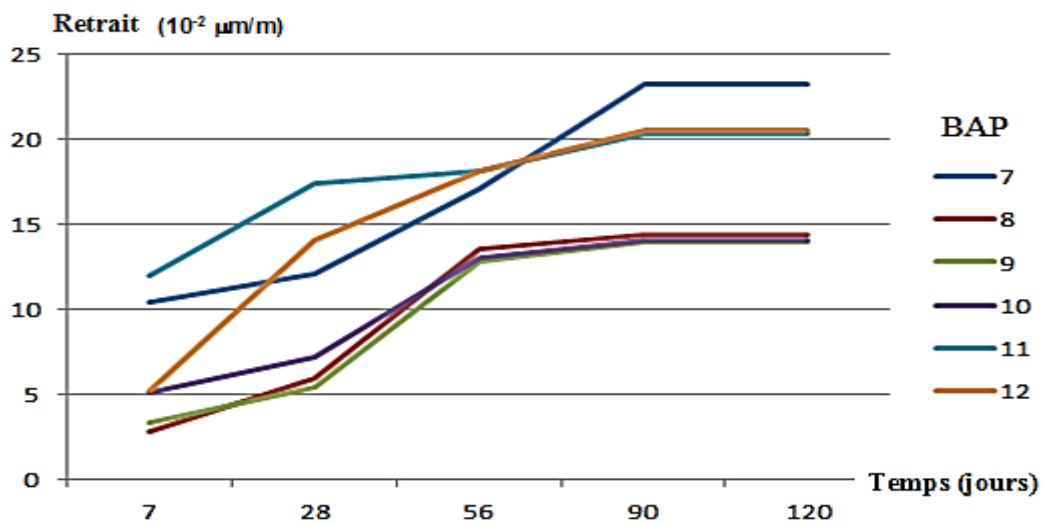


Fig. VII-23 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP ternaire.

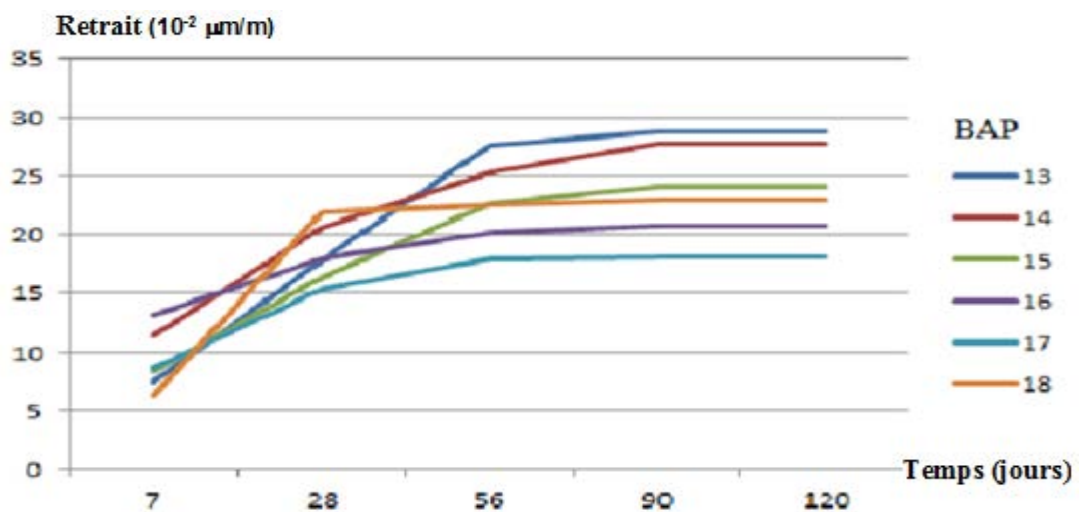


Fig. VII-24 – Évolution du retrait en fonction du temps des BAP quaternaire.

Les variations dimensionnelles dues au retrait présentent des comportements différents en fonction de la nature des additions. Tous les BAP présentent un retrait qui évolue dans le temps, il atteint son maximum et se stabilise vers 90 jours. Le retrait est plus important pour les BAP confectionnés avec les ajouts ternaires (PM, FS et MK) et binaires (PM et FS) par rapport au BAP confectionné avec la PM seul.

La poudre de marbre peut avoir un effet positif en limitant le retrait des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates, ce qui est observé dans la figure VII-21, d'où on remarque que le BAP contenant 25% de PM présente moins de retrait.

VII.8. ABSORPTION D'EAU.

VII.8.1. Absorption d'eau capillaire.

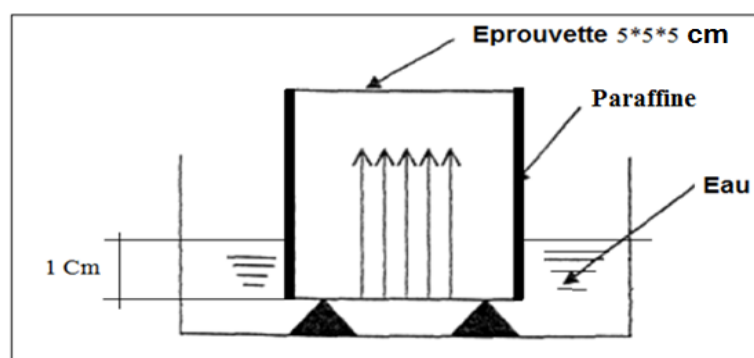


Fig. VII-25 – Schéma du dispositif de l'essai d'absorption d'eau capillaire.

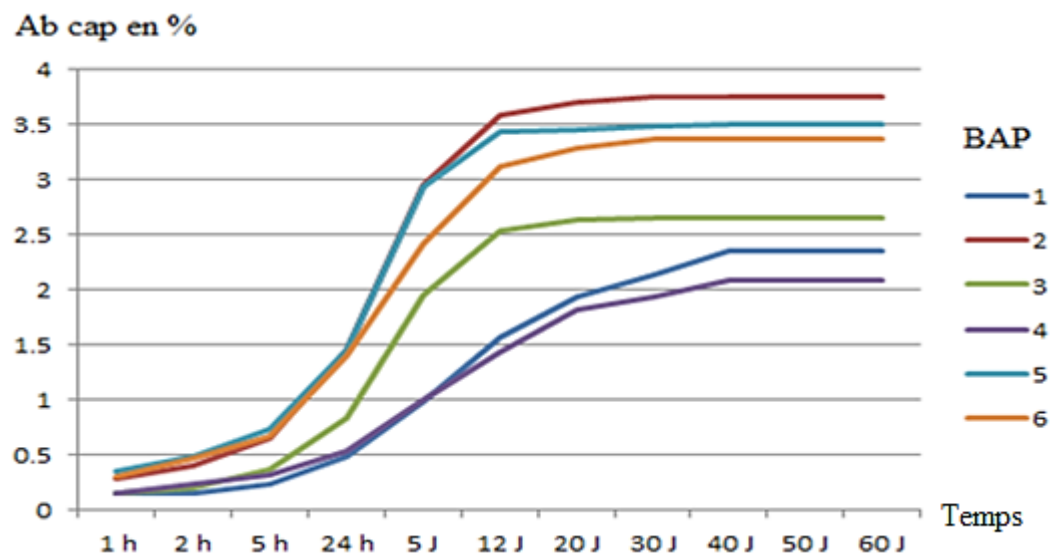


Fig. VII-26 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP binaires.

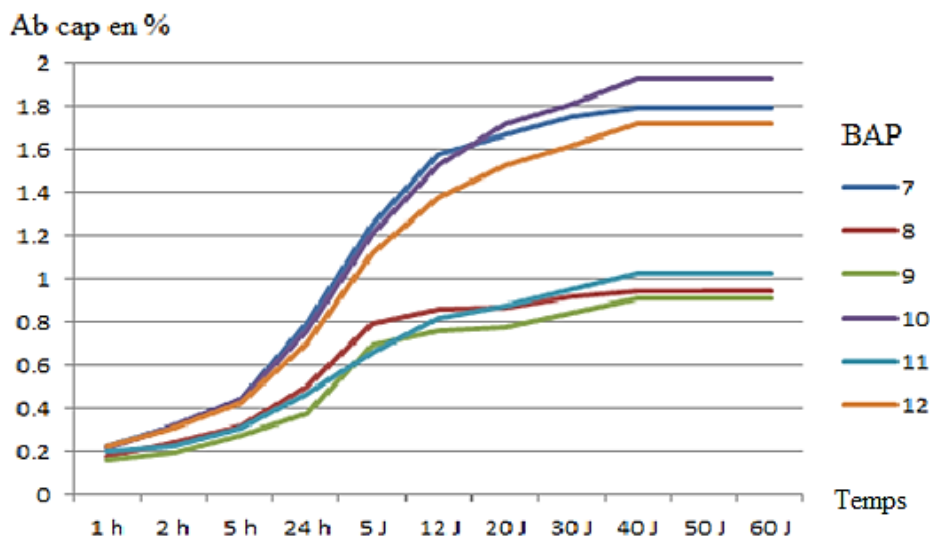


Fig. VII-27 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP ternaires.

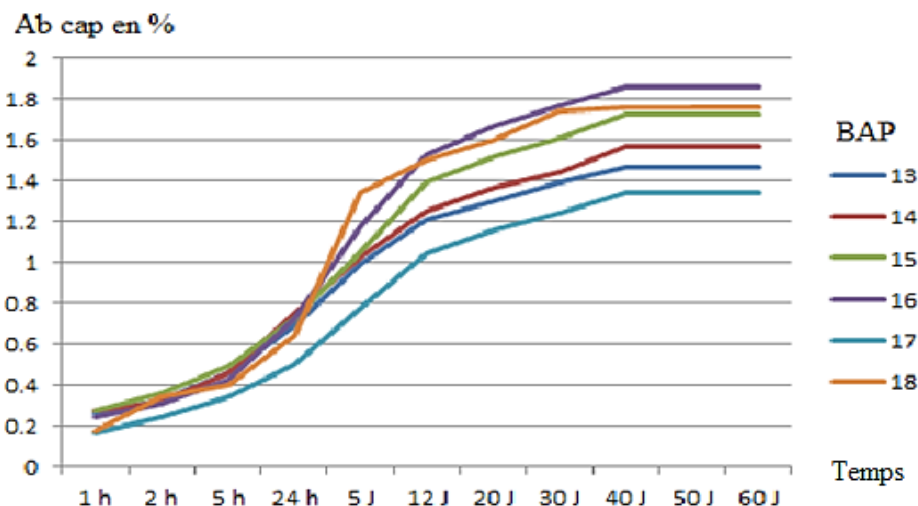


Fig. VII-28 – Évolution de l'absorption capillaire en fonction du temps des BAP quaternaires.

L'influence des ajouts minéraux sur l'absorption d'eau par capillarité est présentée sur les figures VII 25, 26 et 27. Les valeurs de ces figures montrent une augmentation de l'absorption avec le temps (jusqu'à 40 jours), et ce pour tous les mélanges. On remarque que le mélange avec un taux de 20% de PM est celui qui a le coefficient d'absorption le plus petit et au-delà de cette valeur le coefficient d'absorption augmente. Topcu et al. ont testé des BAP à base de différentes teneurs en PM. Ces auteurs ont trouvé que l'augmentation de la teneur en PM jusqu'à 200 kg conduit vers la diminution du coefficient d'absorption d'eau [135].

Par contre, pour les BAP ternaires et quaternaires la finesse de la fumée de silice influence positivement sur l'absorption capillaire d'où on peut conclure que plus la compacité est élevée plus l'absorption capillaire est faible donc la finesse des ajouts minéraux a une influence directe sur ce paramètre.

VII.8.2. Absorption d'eau par immersion.

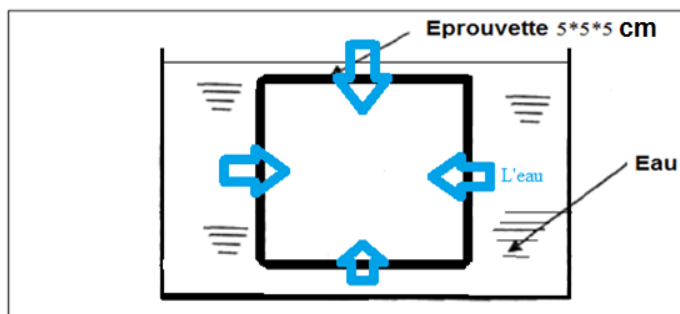


Fig. VII-29 – Schéma du dispositif de l'essai d'absorption d'eau par immersion.

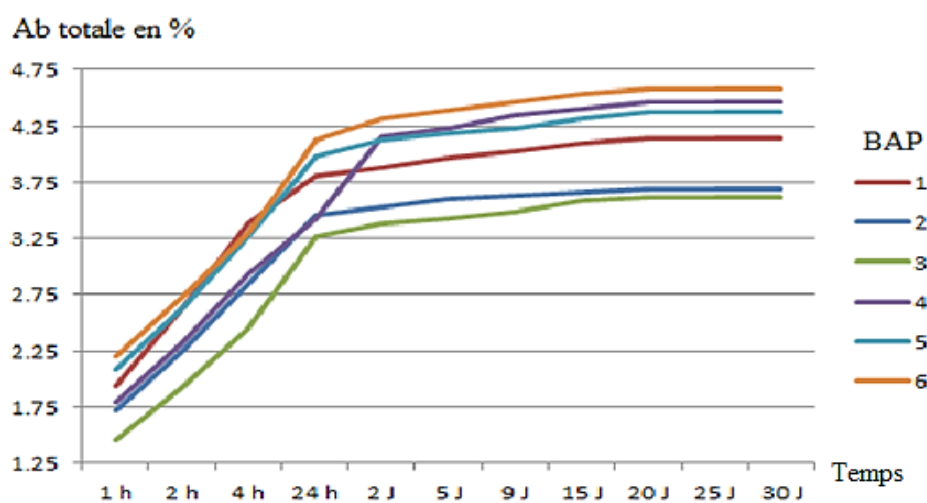


Fig. VII-30 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP binaires.

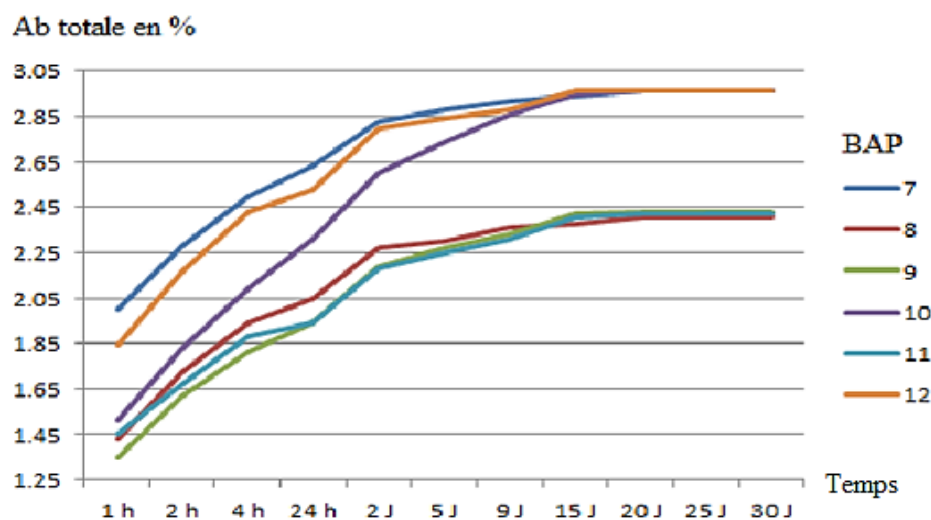


Fig. VII-31 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP ternaires.

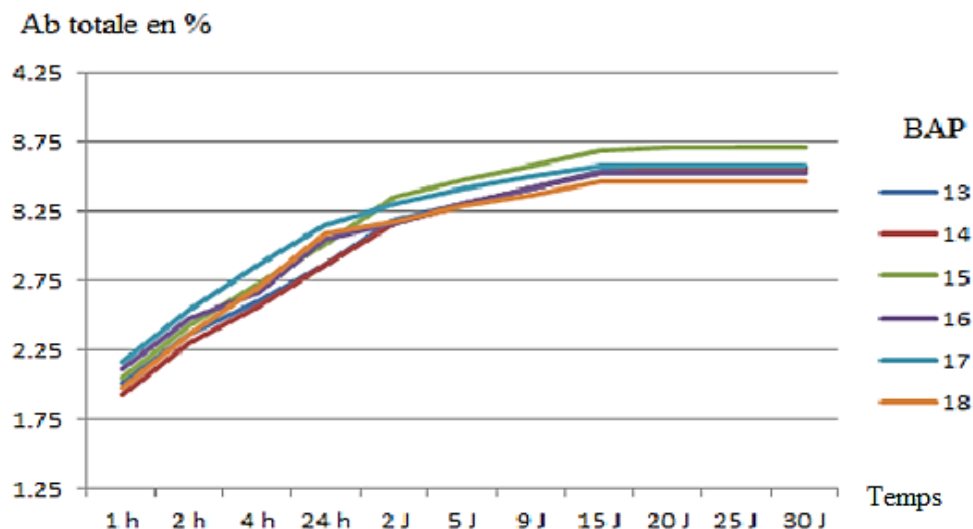


Fig. VII-32 – Évolution de l'absorption par immersion en fonction du temps des BAP quaternaires.

Les résultats obtenus montrent l'effet favorable de la combinaison de la poudre de marbre avec les additions fumée de silice et métakaolin sur l'absorption par immersion. La tendance à la diminution de l'absorption par immersion est fonction du type et du dosage des additions.

En effet, le dosage optimal en poudre de marbre seule semble s'établir à 15%, au-delà duquel l'absorption par immersion a tendance à augmenter. Alors que l'absorption par immersion des BAP avec addition de fumée de silice ou de métakaolin en combinaison avec poudre de marbre diminue avec l'augmentation du dosage. Ce qui peut être expliqué par les natures différentes des additions.

Effectivement, le filler poudre de marbre est une addition inerte ne pouvant avoir qu'un effet de remplissage et de germination hétérogène et comme sa finesse est proche à celle du ciment son influence n'est pas notable. La fumée de silice par son caractère hydraulique s'inscrivant dans le long terme. Le métakaolin en combinaison avec la fumée de silice par son potentiel pouzzolanique, contribuent à la diminution de l'absorption par immersion par la production en plus grande quantité de C-S-H, mais aussi plus dense.

CONCLUSION.

Cette étude expérimentale a mis en évidence la possibilité d'utiliser le déchet de marbre comme substituant partiel au ciment dans la composition des BAP. Les essais caractéristiques effectués sur les bétons frais ont prouvé une maniabilité et stabilité satisfaisantes des BAP contenant jusqu'à 30% de filler de marbre.

Cette satisfaction est habituellement attribuée, d'un côté à leurs particules les plus fines qui peuvent remplir les vides entre les grains grossiers du ciment et libérer l'eau captivée entre eux, et d'un autre côté, à leur morphologie qui présente une faible adsorption d'eau et une faible hydratation. La grande finesse ($\pm 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$) des PM ainsi que leur non réactivité lors de l'hydratation tendent à améliorer beaucoup plus la fluidité. En revanche, tout excès des additions minérales par rapport à la quantité nécessaire pour combler les vides intergranulaires peut affecter la fluidité.

La substitution de la poudre de marbre utilisée dans les bétons autoplaçants par la fumée de silice et le métakaolin doit non seulement satisfaire les critères d'ouvrabilité du béton frais (étalement, taux de remplissage et stabilité) et de résistance mécanique du béton durci, mais également présenter des propriétés de durabilité au moins équivalentes voire meilleures que celles obtenues par l'emploi de la poudre de marbre seule.

Afin de répondre à ces préoccupations, un programme expérimental a été mis en place pour comprendre et apporter des éléments de réponse sur la possibilité d'apporter une amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques à court et long terme.

Le volume de pâte recommandé pour la formulation d'un BAP doit être de 330 à 400 l/m³ de béton correspondant à un dosage en poudre (ciment + addition) de l'ordre de 500 kg/m³ en moyenne. Une étude apparaissait donc importante afin de caractériser l'effet de l'addition, en fonction de sa nature et de son dosage, sur l'écoulement de la pâte en tant que phase prépondérante du BAP. Trois dosages d'addition 30, 40 et 45% en substitution au ciment ont été fixés.

L'étude préliminaire réalisée sur pâtes pures a permis de tirer les enseignements suivants :

- Les propriétés rhéologiques dépendent de la finesse, la nature de l'ajout nature et son dosage. Ainsi la poudre de marbre est caractérisée par des demandes en eau et en superplastifiant modérées par rapport à la fumée de silice et le métakaolin qui ont un effet d'épaississement.
- L'incorporation de la poudre de marbre et de fumée de silice à un dosage de 30% par rapport à la masse du ciment permet d'améliorer l'étalement des pâtes. Tandis que pour le métakaolin en combinaison avec la poudre de marbre et fumée de silice, il semblerait que le dosage permettant d'améliorer l'étalement de la pâte soit inférieur à 30%.
- L'augmentation du dosage en addition entraîne une augmentation de la concentration volumique en solides, ce qui induit un accroissement des propriétés rhéologiques telles que le seuil de cisaillement statique et la viscosité, se traduisant par l'amplification du comportement rhéoépaississant des suspensions cimentaires quelle que soit la nature de l'addition.
- Les fillers poudre de marbre améliorent les résistances mécaniques à court terme, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours. La fumée de silice et le métakaolin permettent d'obtenir de bien meilleures résistances à plus longues échéances, principalement par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours. La cinétique de durcissement est fortement influencée par la nature de l'addition (mécanisme pouzzolanique).
- Les additions minérales contribuent au remplissage des vides en plus de ce que l'hydratation du ciment seul peut apporter, par la formation d'hydrates lors de la prise et du durcissement. L'amélioration de la compacité du béton est d'autant plus importante que l'addition est réactive.

En conclusion, la faisabilité d'un béton autoplaçant à base d'un ciment binaire, ternaire et quaternaire est envisageable et cela même pour un dosage de l'ordre de 45% par rapport au

pois du ciment. Les propriétés rhéologiques et mécaniques ont été prouvées par les différents essais qui couvrent les critères de l'AFGC, dont les résultats ont été présentés au cours de cette étude. Les résultats obtenus permettent dans un premier temps d'envisager l'utilisation de poudre de marbre comme addition dans les bétons autoplaçants, un marché prometteur et en particulier en Algérie où la demande ne cesse de croître. Cependant, des études supplémentaires restent à réaliser, notamment, sur la durabilité.

VII.9. VALORISATION DU CIMENT AVEC AJOUT CIMENTAIRE POUDRE DE MARBRE DANS LES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES.

VII.9.1. Introduction.

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 au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration. L'addition des fibres influence 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. [110].

Dans la plupart des cas, les bétons autoplaçants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un type de fibre. L'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes peut potentiellement non seulement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant, mais peut aussi contribuer à un gain conséquent de fibres. La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation ou mixage est étudiée dans cette partie pour des bétons autoplaçants.

L'objectif principal est d'évaluer les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques de ces BAP fibrés. Le choix d'une telle investigation est justifié par le fait que les études des BAP fibrés n'ont pas bénéficié du même intérêt que les bétons ordinaires fibrés ou les BAP sans ajout de fibres.

VII.9.2. Caractérisation des performances d'un béton autoplaçant renforcé de fibres.

Lorsque l'on considère la littérature portant sur le comportement des bétons autoplaçant de fibres métalliques, il apparaît que les informations obtenues sont très nombreuses mais souvent pas directement transposables, ni généralisables.

Il est extrêmement difficile de déterminer l'apport exact des fibres par rapport à un béton autoplaçant car le nombre de paramètres influents est considérable. Les études rapportées dans la littérature donnent souvent des résultats globaux, sans séparer les caractéristiques du matériau, et les effets induits par l'élément de structure testé. Dans le cadre de cette partie nous restons au niveau de la satisfaction des recommandations de l'AFGC pour l'état frais et les caractéristiques mécaniques supérieures à celle des BAP sans fibres, en essayant toutefois d'expliquer phénoménologiquement les constatations expérimentales, grâce à quelques manipulations.

Plusieurs types de fibres ont été retenus. Ces fibres se distinguent par leur nature, leur géométrie, en premier temps on a l'évaluation des fibres à crochets à différentes tailles par la suite une combinaison entre les fibres à crochets et les fibres ondulées et on termine par une hybridation entre les fibres métalliques et les fibres de verre et les fibres de polypropylène.

VII.9.3. Caractérisation des performances d'un béton autoplaçant renforcé de fibres à crochets.

Les compositions retenues sont récapitulés dans le tableau VII- 4.

Tableau VII-4 – Différentes compositions des BAP et BAPF d'un mètre cube de béton.

Notations	E/L	L'eau (kg/m ³)	Liant (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Poudre de marbre		Sable (kg/m ³)		gravillon (kg/m ³)	Longueur des fibres (mm)	Volume des fibres (%)	Super plastifiant SP (l/m ³)	Agent de viscosité (l/m ³)
					(%)	(kg/m ³)	Sable de dune Sd	Sable de rivière Sr					
BAP	0,34	170	500	350	30	150	193,5	676,8	791,5	0	0	5,7	1,2
BAPF1							185,4	648,5	758,4	25	0,35		
BAPF2							175	612	715,85		0,8		
BAPF3							170,4	596	697	30	1		
BAPF4							185,4	648,5	758,4		0,35		
BAPF5							175	612	715,85		0,8		
BAPF6							170,4	596	697	50	1		
BAPF7							185,4	648,5	758,4		0,35		
BAPF8							175	612	715,85		0,8		
BAPF9	170,4	596	697	1									

VII.9.4. Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique [9] ; cependant on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoires la fluidité et la ségrégation. Par conséquent les BAP doivent satisfaire plusieurs tests ; dont nous avons choisi trois qui sont recommandés par [4] qui permettent de caractériser les principales propriétés du BAP à l'état frais (l'étalement au cône d'Abrams, T500 l'écoulement à la boîte en L et la stabilité au tamis). Le gâchage des bétons et les essais de caractérisation ont été effectués selon les procédures décrites par [4] dont les valeurs limites sont déjà données.

Résultats des essais.

Les essais effectués sur béton frais ont pour but l'étude de l'effet des fibres sur ses propriétés rhéologiques. Les compositions des mélanges sont présentées dans le tableau 4, Les propriétés de chacune de ces compositions à l'état frais sont notées dans le tableau VII-5.

Tableau VII-5 – Caractérisation des BAP et BAPF à l'état frais.

Notations	Étalement (mm)	T ₅₀₀ (s)	Boîte en L H ₂ /H ₁	Stabilité au tamis (%)
BAP	727	2,84	0,94	3,2
BAPF1	693	3,38	0,88	3,18
BAPF2	668	3,86	0,83	3,44
BAPF3	653	4,2	0,81	3,58
BAPF4	655	4,5	0,84	2,94
BAPF5	649	4,7	0,82	3,16
BAPF6	625	4,9	0,81	3,18
BAPF7	638	4,7	0,83	2,18
BAPF8	619	4,9	0,81	2,38
BAPF9	594	5,0	0,80	2,52

Idem que la partie VI.7 d'après les essais à l'état frais des différents bétons (tableauVII- 5) nous pouvons constater que l'ensemble des bétons répondent aux critères de la stabilité au tamis, écoulement à la boîte en L, d'étalement au cône et le temps d'étalement T₅₀₀, ces derniers sont compris respectivement entre 2,18 – 3,58 % ; 0,80 – 0,45 ; 594 - 727 mm et 2,84 - 5 s. Dans ce cas l'incorporation des fibres métalliques, engendre une légère différence entre le BAP et les BAPF. Ceci peut être expliqué par l'effet combine de l'ajout poudre de marbre et le superplastifiant [123, 124], sans omettre l'effet de l'élancement ; plus les fibres sont courtes plus le problème de blocage est faible.

L'augmentation de la déformabilité peut être due au fait que la poudre de marbre possède une finesse plus grande que le ciment (3600 contre 3300 g/cm²), ce qui contribue à l'amélioration de l'ouvrabilité des BAP, et à l'augmentation du volume de pâte (puisque la densité de la PM est inférieure à celle du ciment), qui tend à écarter les fibres et les particules des granulats les uns des autres en réduisant par conséquent le frottement à l'interface granulats-pâte. Par ailleurs, l'augmentation du volume de la pâte contribue à l'amélioration de la répartition des fibres.

VII.9.5. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques des BAP.

La caractérisation de l'état durcis des différentes compositions s'est limitée aux essais suivants : essai de compression, essai de traction par fendage et par flexion et l'essai non destructif.

Résistance à la compression.

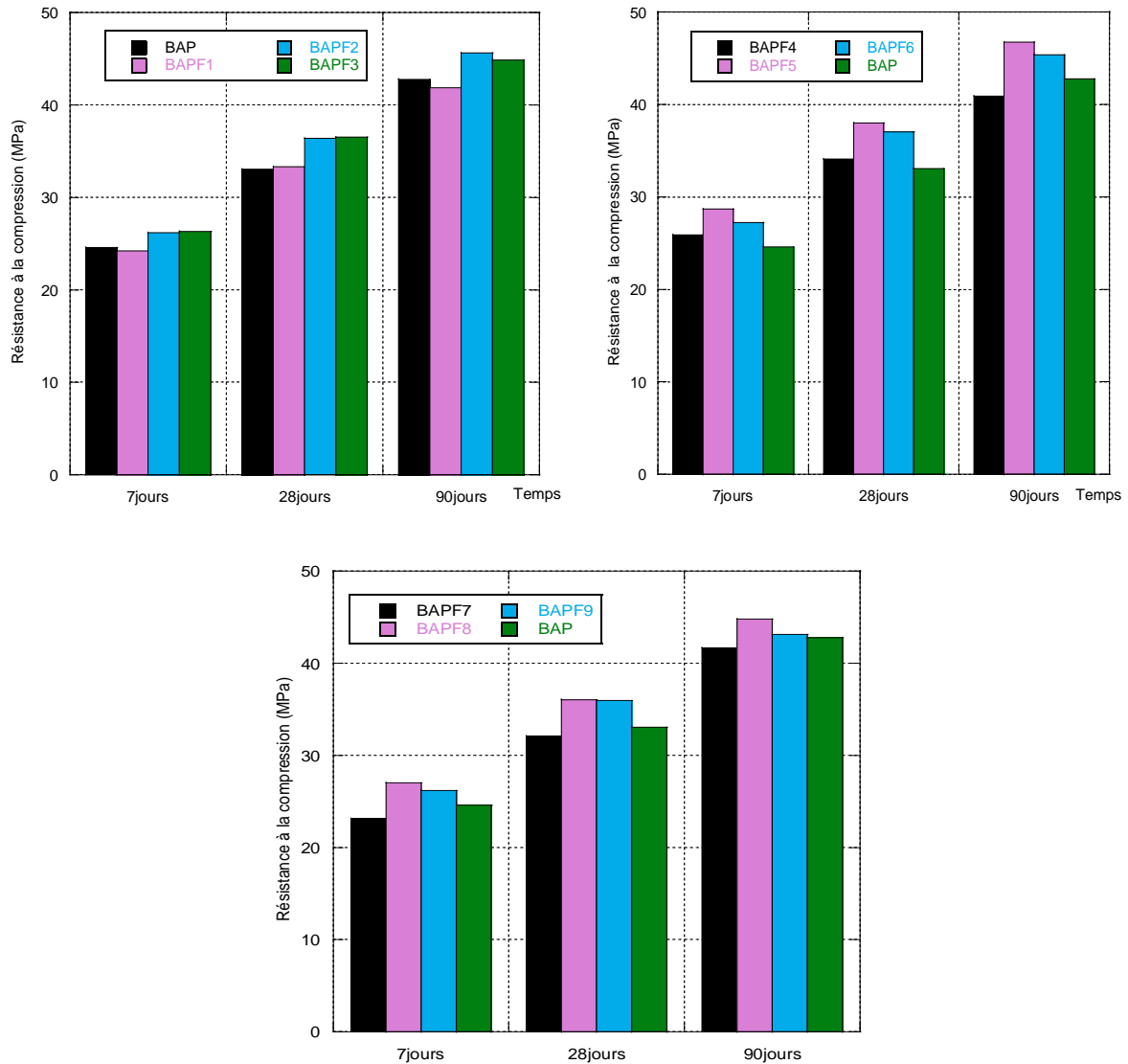


Fig. VII-33– Résistance à la compression des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.

D'après la figure VII-32, on constate que la présence de fibres métalliques a une faible influence sur la résistance à la compression. Plus précisément la résistance à la compression s'accroît légèrement quand le dosage en fibres longues est plus important. On attribue cette évolution à l'orientation des fibres qui s'oppose à la propagation des fissures. Il a été montré qu'en compression les fibres longues interviennent au niveau des macrofissures obliques et verticales [136]. Ce concours se traduit surtout par une élévation des frottements entre les lèvres des macrofissures, frottements qui peuvent conduire à un gain apparent de résistance à la compression, alors qu'il s'agit d'une amélioration de la capacité portante de l'éprouvette.

Pour justifier que cette augmentation de résistance à la compression est apparente on a fait recours à l'essai non destructif ce dernier repose sur la vitesse de propagation d'onde sonore, d'après les résultats trouvés on remarque que la vitesse de propagation des BAP est inférieure à celles des BAPF ; cette augmentation est attribuée à la masse volumique des fibres.

Ce qui est important à mentionner pour l'essai de compression et de traction par fendage, est que le mode de rupture des éprouvettes fibrées a complètement été modifié. Il est passé d'un mode de rupture fragile pour le BAP sans fibres où l'éprouvette est complètement rompue en deux, à une rupture progressive et ductile où l'éprouvette reste en un seul morceau, difficile à casser. Cela traduit le rôle mécanique de la fibre qui est activé après apparition des fissures.

Résistance à la Traction par fendage.

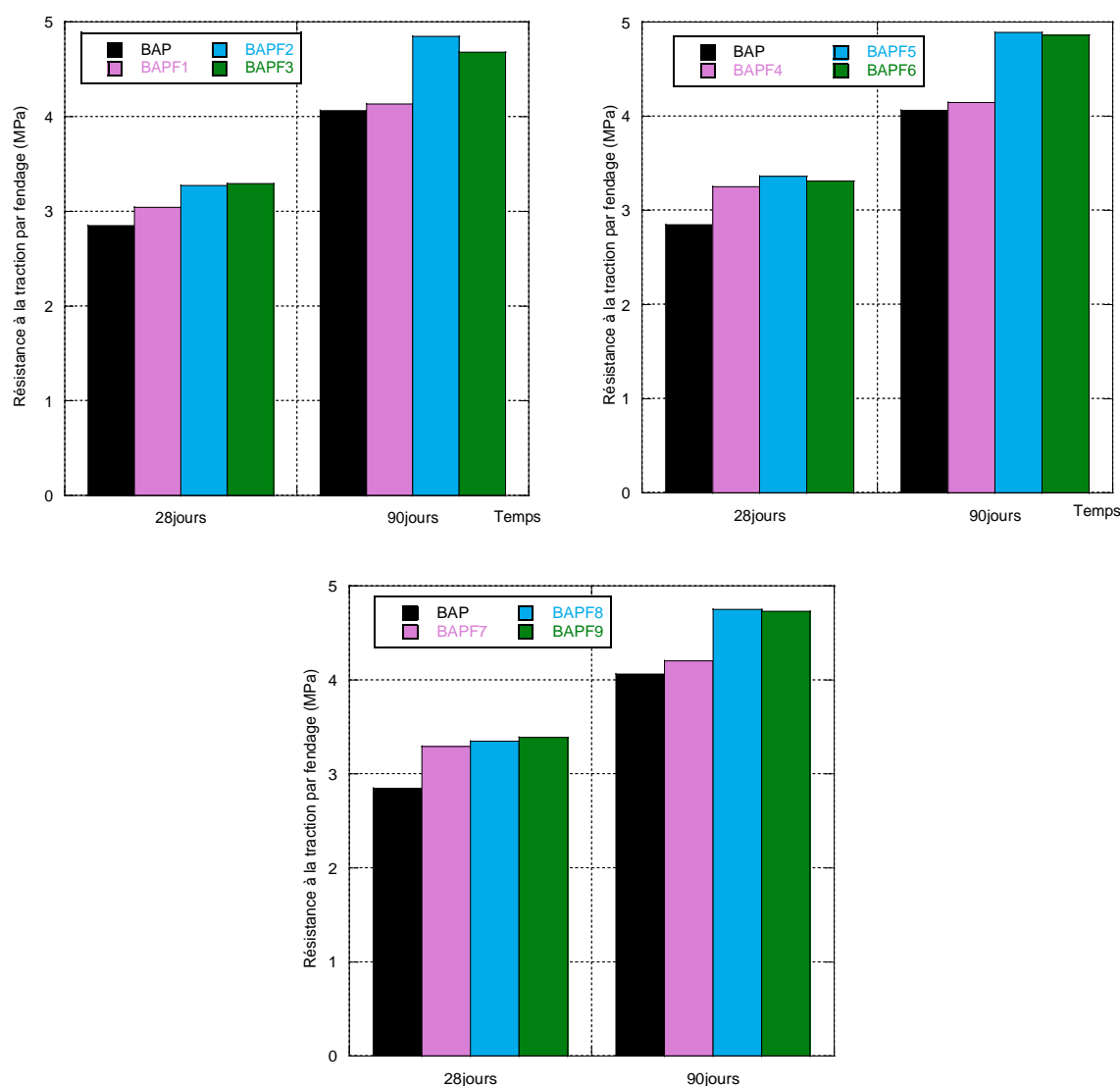


Fig. VII-34 – Résistance à la traction par fendage des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.

L'essai de fendage est exécuté selon la norme NF EN 12390-6. L'éprouvette cylindrique est comprimée le long de deux génératrices diamétralement opposées. Pour éviter une rupture locale en compression au niveau des génératrices de chargement et répartir la charge appliquée, deux bandes minces en acier d'une largeur de 10 mm, d'une épaisseur de 4 mm et

d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette, sont placées entre les plateaux de chargement et l'éprouvette.

On constate que la résistance au fendage est améliorée avec l'utilisation des fibres particulièrement pour les BAP renforcés de fibres de longueur moyenne de l'ordre de 30mm, en raison de la meilleure adhérence fibre-matrice. Après fissuration, la résistance est reprise par les fibres interceptant la fissure ; ceci permet aux éléments en béton contenant des fibres de supporter d'avantage le chargement, même au-delà de la fissuration.

Ces fibres se déforment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. Les fibres traversant la fissure reprennent les contraintes et se déforment, celles-ci ne traversant pas de fissures restent non stressées. Les résultats ont montré que le comportement post pic a été nettement amélioré.

Résistance à la Traction par flexion.

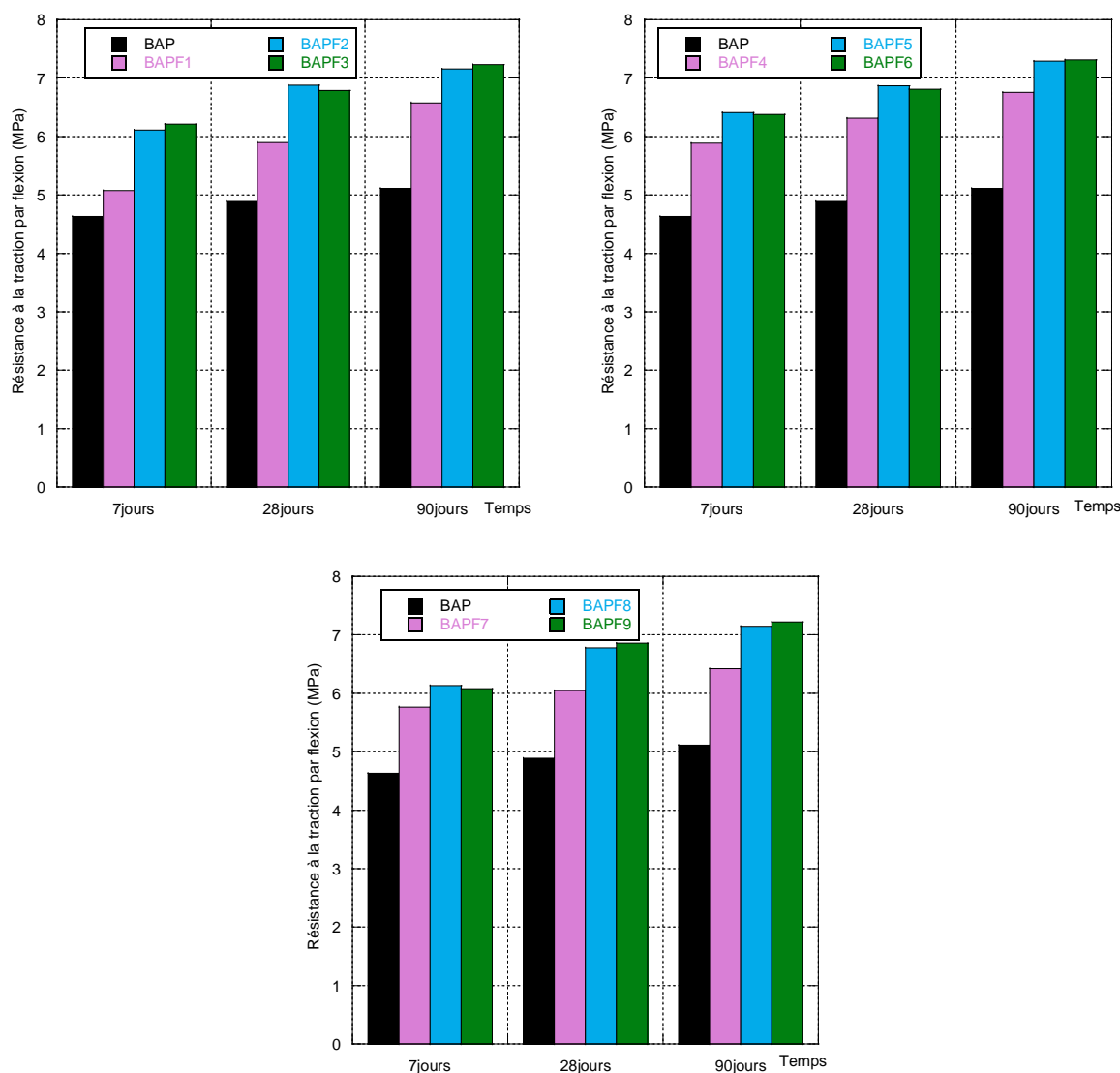


Fig. VII-35 – Résistance à la traction par flexion des BAP et BAPF à différent pourcentage et longueur de fibre.

Dans l'essai de flexion, les fibres sont efficaces si elles sont orientées dans le sens de la traction. Cette efficacité est plus importante pour les bétons autoplaçants grâce à une bonne adhérence du couple fibre-matrice. L'essai consiste ici à rompre en flexion trois points une éprouvette prismatique $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

L'optimum est atteint au dosage de 0,8 % et une longueur de 5 cm. Il a été observé que pour le béton témoin sans fibres, une fois la rupture est atteinte, l'éprouvette s'est cassée en deux blocs séparés, ce qui reflète le comportement fragile du béton non renforcé.

La résistance à la traction par flexion augmente avec le dosage volumique et l'élançement de la fibre. On remarque une augmentation considérable de l'effort de traction des spécimens avec un dosage en fibres de 0,8 % et 1% avec un élançement de 50, l'augmentation est de 39 et 41 % pour les BAPF8 et BHPF9 respectivement. Pour les spécimens dosés à 0,8 et 1 % avec un élançement de 30, l'augmentation est de 42 et 43 % respectivement pour les BAPF5 et BAPF6. Les fibres se sont avérées plus efficaces dans les BAP. Cette augmentation est attribuée à la bonne adhérence entre les fibres et la matrice et cela grâce à l'effet positif de l'association de la poudre de marbre et le superplastifiant. L'augmentation de la résistance en flexion du béton renforcé de fibres métalliques est beaucoup plus importante que celle à la compression, la flexion varie avec la géométrie de la fibre et son pourcentage.

VII.9.6. Effet des fibres sur la vitesse de propagation de l'onde.

D'après les résultats de cette étude, on constate que la vitesse de propagation d'onde ne semble pas être affectée par le volume et l'élançement des fibres. Il est clair d'après la figure VII-36 que le phénomène d'hydratation continu avec l'âge. L'augmentation de la vitesse de propagation d'onde des BAPF peut être justifiée par la masse volumique des fibres qui est importante [125, 126].

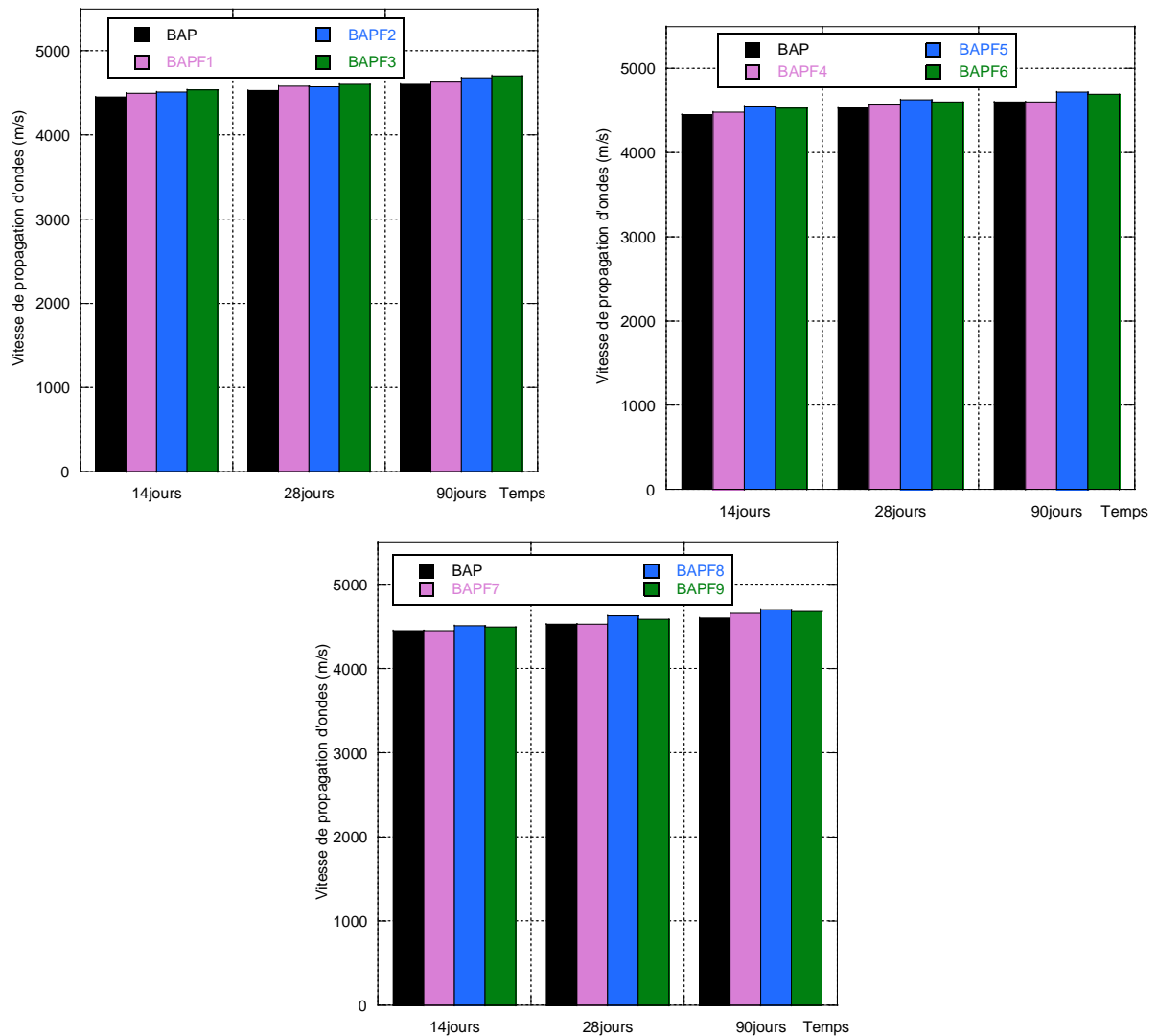


Fig. VII-36 – Variation de la vitesse de propagation de l'onde des BAP et BAPF à différents pourcentages et longueurs de fibre.

CONCLUSION.

Il a été observé qu'il est possible d'aboutir à des propriétés autoplaçantes avec l'inclusion des fibres métalliques à crochets. Sur la base des résultats trouvés, il peut être déduit que l'ajout de fibres métalliques a une légère répercussion sur la fluidité et la maniabilité dont le facteur principal influençant la fluidité est la géométrie des fibres plus que leur pourcentage.

Afin d'assurer une fluidité acceptable l'augmentation du volume de pâte semble indispensable. L'augmentation de la teneur en ciment, l'incorporation d'ajout peuvent être des solutions alternatives à ce problème.

Pour les propriétés à l'état durci, bien que la relation existante entre la résistance et le taux de fibres soit incontournable d'autres facteurs peuvent influencer ce comportement. Parmi eux la nature des additions minérales utilisées, la nature des granulats et l'étendu granulaire. La géométrie des fibres ainsi que le dosage de ces dernières jouent un rôle important sur le comportement mécanique mais aussi sur la maniabilité du mélange. L'utilisation des fibres de

forme à crochet et avec un rapport longueur/diamètre (25, 30, 50) moins élevé a changé énormément le mécanisme d'endommagement et a augmenté les forces relatives à la charge ultime des BAP. La résistance à la flexion est nettement améliorée avec l'augmentation du taux des fibres ce qui laisse croire qu'une réduction d'une partie de ferrailage est possible surtout dans le cas des armatures de compression, des gains de résistance en flexion de l'ordre de 15 à 43% pour les BAPF avec poudre de marbre. Ceci montre la possibilité d'élaboration des bétons autoplaçants à base de fillers de poudre de marbre local en substitution avec le ciment.

VII.10. CARACTERISATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT BI-FIBRE.

Cette étude contribue à la compréhension des effets des paramètres de mélange, tels que le volume et la nature des fibres métalliques, le pourcentage d'ajout et la composition du béton, ainsi que l'évaluation de l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques du béton frais (rhéologie, capacité de remplissage et stabilité) et durci (résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, résistance à la traction par fendage et la vitesse de propagation d'onde) semble être très utile [127].

Il a été démontré dans la partie précédente que pour une même teneur et un même type de fibres, l'efficacité des fibres de 30 mm est meilleure que celle de 50 mm aussi bien pour les résistances à la traction que pour la compression. Ce comportement est expliqué par les aspects de porosité, d'ouvrabilité et de mise en œuvre, qui sont plus favorables pour le cas des fibres de 30 mm. De plus il apparaît qu'une fibre d'acier de section plus fine permet une meilleure liaison d'interface fibre-matrice.

L'association des fibres à crochet de section fine avec les fibres ondulées qui sont à bas prix et disponibles sur le marché Algérien dans les BAP n'a pas encore vu le jour. Kawamata et al. ont essayé d'utiliser dans le cas des bétons autoplaçants des fibres longues en association avec les fibres courtes. Selon ces auteurs, les fibres courtes empêchent la formation des petites fissures, retardant ainsi la formation des microfissures, qui seront à leur tour reprises par les fibres les plus longues et demandent une plus grande dissipation d'énergie pour rompre. Par-là la ductilité du matériau serait augmentée [128].

Tableau VII-6 – Différentes compositions des BAP et BAPF.

Notations	E/L	Eau	Liant	Ciment (kg/m ³)	Fillers Poudre de marbre (kg/m ³)	sable (kg/m ³)		Gravillons (3/8 et 8/15) (kg/m ³)	Fibres (kg/m ³)		SP (l/m ³)	AV (l/m ³)
						0/1	0/5		Fibres ondulées 30mm (VFC)	Fibres à crochets 50mm (VFL)		
BAP	0,34	170	500	350	150	173	610	790	0	0	5,9	1,43
BAPF1	0.34	170	500	350	150	190	720	717	60	0	5,9	1,43
BAPF2	0.34	170	500	350	150	190	720	717	42	18	5,9	1,43
BAPF3	0.34	170	500	350	150	190	720	717	30	30	5,9	1,43
BAPF4	0.34	170	500	350	150	190	720	717	18	42	5,9	1,43
BAPF5	0,34	170	500	350	150	190	720	717	0	60	5,9	1,43

VII.10.1. Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP.

Dans ce paragraphe, nous étudions successivement les effets de l'addition de poudre de marbre et des renforts en combinaison sur les propriétés des bétons autoplaçants et des bétons autoplaçants renforcés de fibres.

Tableau VII-7 – Caractérisation des BAP et BAPF à l'état frais.

Notations	Étalement (mm)	T500 (s)	H ₂ / H ₁ (%)	Stabilité au tamis (%)
BAP	708	3,32	0,95	5,52
BAPF1	705	4,06	0,92	4,9
BAPF2	700	4,23	0,93	4,62
BAPF3	675	4,51	0,89	4,12
BAPF4	648	4,86	0,83	4,22
BAPF5	612	5,03	0,81	3,03

Des résultats du tableau VII-7, on remarque que l'introduction des fibres longues conduit à une diminution appréciable de l'étalement, à une augmentation du temps d'étalement et à une diminution du pourcentage de laitance perdue à l'essai au tamis. Ceci s'explique par le rôle que jouent les fibres dans le mélange.

L'étalement est diminué parce que les fibres, de part leur élancement, bloquent le système lors de son étalement.

Le temps d'étalement est considérable, parce que les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage de l'écoulement.

Quant au mouvement du béton dans la boîte en L, le système est rapidement bloqué par la formation de maillage très réduit au niveau des barres d'armatures de la boîte.

En ce qui concerne le pourcentage de laitance perdue au tamis qui a diminuée pour les bétons renforcés de fibres longues, ce qui peut paraître à priori normale, s'explique par le fait que l'on a une bonne adhésion entre le mortier et les granulats ainsi que les fibres, qui retenait une quantité de laitance.

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans un béton renforcé de fibres [129]. Pour un dosage en fibres donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

La combinaison entre les fibres courtes et longues peut atténuer le problème des propriétés rhéologiques quoique les résultats trouvés répondent aux critères autoplaçants.

Tableau VII-8 – Caractérisation des BAP et BAPF à l'état durcis.

Notations	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la traction par fendage (MPa)		Résistance à la traction par flexion (MPa)		Vitesse de propagation d'onde (m/s)		
	7d	28 d	56 d	28 d	56 d	28 d	56 d	7d	28 d	56 d
BAP	28,63	35,45	38,56	2,32	2,68	4,45	4,79	3926	4038	4158
BAPF1	30,63	37,74	40,36	2,51	3,41	4,6	4,89	4098	4252	4398
BAPF2	29,45	35,78	38,25	2,72	3,84	5,08	5,28	4162	4292	4303
BAPF3	27,22	36,56	36,71	3,12	3,86	5,53	5,81	4208	4312	4377
BAPF4	26,57	33,62	37,41	3,52	4,22	5,49	5,97	4158	4271	4359
BAPF5	25,44	33,18	36,39	3,83	4,53	5,93	6,29	4247	4324	4358

Les performances mécaniques étudiées sont la résistance à la compression, résistance à la traction par fendage et par flexion et la vitesse de la propagation d'ondes.

Notons que le pourcentage des fibres retenu, représente le pourcentage volumique optimum de l'étude précédente rapporté au volume total du béton.

Des résultats du tableau VII-8, nous présenterons les différentes influences des paramètres de composition sur la résistance à la compression, traction par fendage et par flexion et vitesse de propagation de l'onde.

Les résistances sont présentées en fonction du temps. En analysant les résultats obtenus, on peut voir que les résistances des bétons sont quasiment croissantes, il y a une proportionnalité entre l'hydratation et l'accroissement de la résistance en fonction de l'âge.

Nous remarquons que les BAP avec fibres à crochet longues sont nettement plus résistant que celles des BAP de fibres ondulées pour toutes les échéances et cette différence est attribuée aux propriétés mécaniques des fibres. Les fibres ondulées courte assurent un retardement de l'apparition de la première fissure et une efficacité dans la restriction et ceci grâce à leur bonne adhérence mais leur module d'élasticité qui n'est pas élevé les rend moins rentable. Les fibres à crochet longues avec un module d'élasticité élevé procurent une réserve de sécurité importante pour le composite fibré en lui conférant un palier ductile, qui est d'un intérêt vital pour les BAP.

On peut remarquer que l'introduction de fibres métalliques n'affecte pas beaucoup la résistance à la compression des BAP, et cela est déjà vérifié quel que soit l'âge du béton.

Mais il est à noter que le béton autoplaçant avec fibres longues présente une faible résistance à la compression c'est pour cette raison que l'hybridation peut présenter une solution alternative.

L'augmentation du taux de substitution des fibres courtes par des fibres longues, fait chuter la résistance à la compression de 17% à 7 jours, de 15% à 28 jours et de 16 % à 56 jours. Toutefois, il est intéressant de constater que même avec 60 kg de fibres longues la résistance à la compression reste dans des limites raisonnables (>25 MPa).

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm³, en utilisant un dispositif de flexion 3 points et pour la traction par fendage des éprouvettes cylindriques 15 x30 cm³. Trois éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge.

Similairement à la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion et par fendage augmente avec l'âge, le béton qui à donner les meilleures performances est le BAPF5 contrairement à la compression qui est le BAPF1.

On remarque que la résistance à la traction par flexion du BAPF5 est supérieure à celle du BAPF3 bien que la résistance à la compression du BAPF5 est inférieure à celle du BAPF3. Ceci est dû essentiellement à l'élancement et la nature des fibres utilisés.

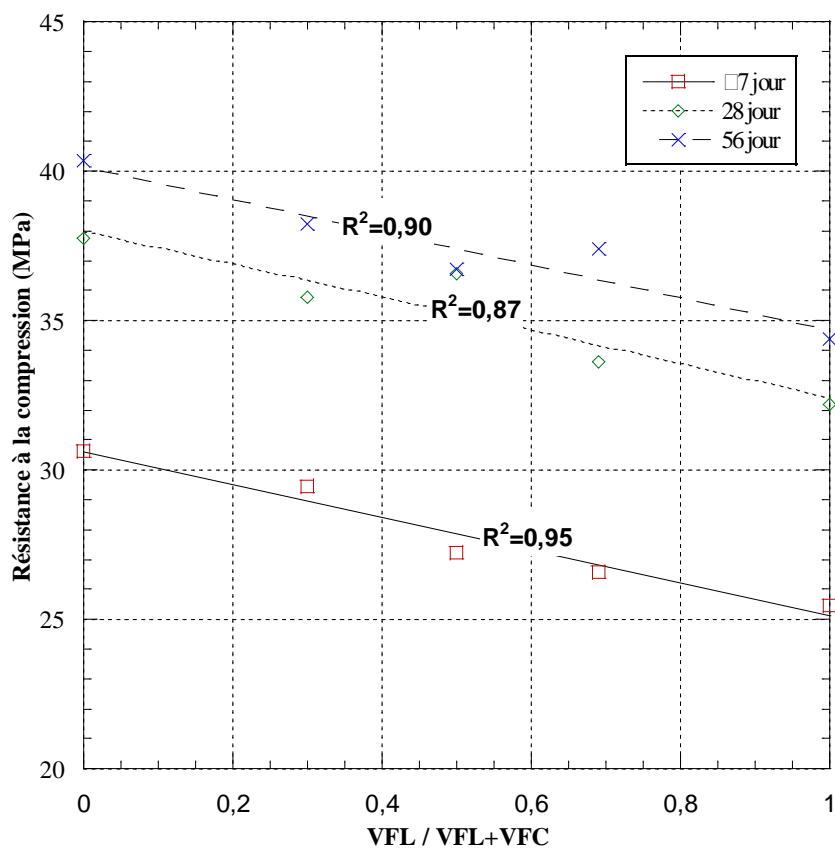


Fig. VII-37 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la compression.

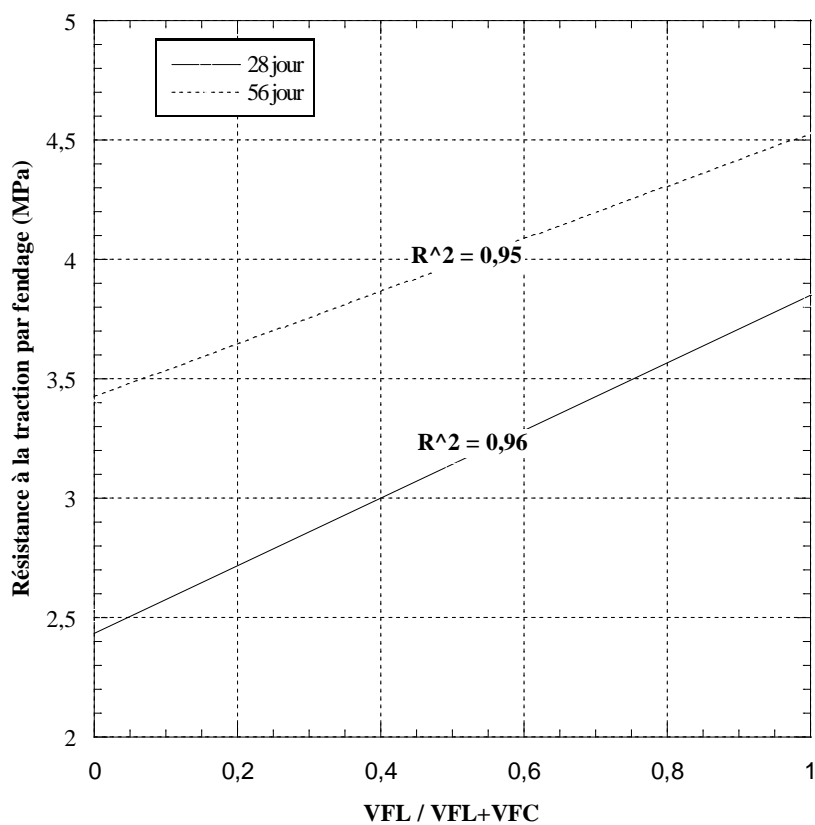


Fig. VII-38 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la traction par fendage.

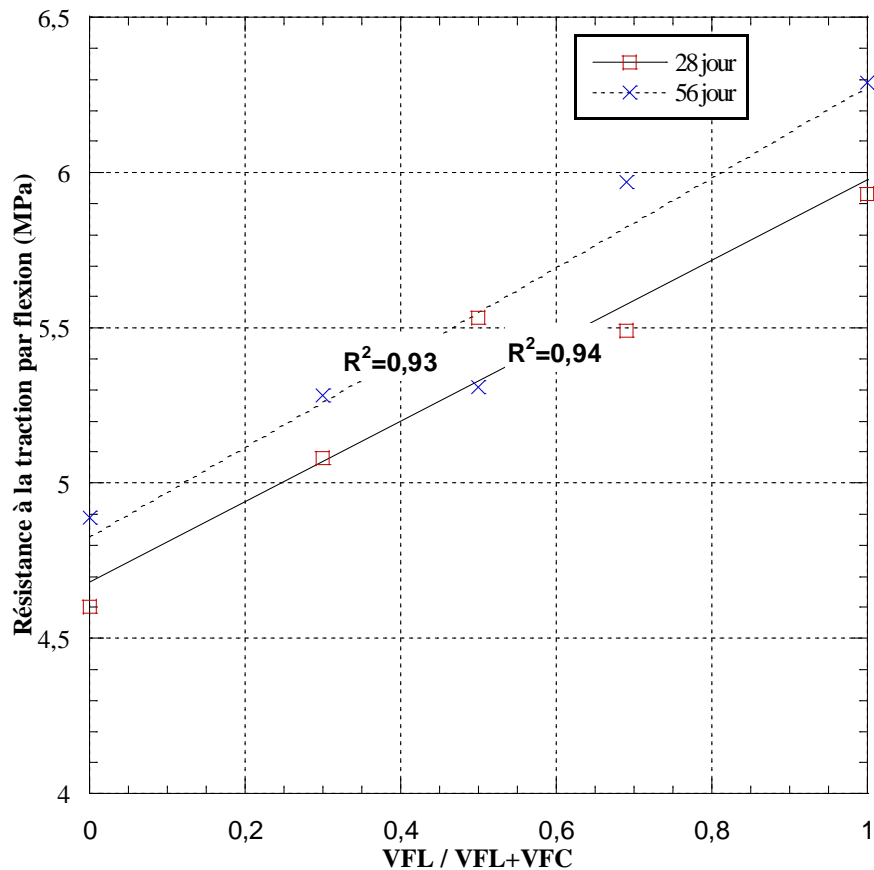


Fig. VII-39 – Effet de l'hybridation des fibres métalliques sur la résistance à la traction par flexion.

Il apparaît clairement d'après les figures VII 36, 37 et 38 qu'un gain de résistance est enregistré lors de l'augmentation du rapport VFL/ VFL+VFC (VFL qui présente le volume des fibres longues, VFC est le volume des fibres courtes). Ce gain est traduit par une augmentation de la capacité portante. En effet pour une même teneur en fibres (dosage égal), l'efficacité des fibres à crochets est meilleure que celles des fibres ondulées, aussi bien pour les résistances en flexion que pour la traction par fendage. Cet aspect est lié directement à certaines propriétés mécaniques, tel que la résistance à la traction des fibres, l'élançement, et la mise en œuvre bien que les propriétés rhéologiques des fibres courtes qui sont plus favorables pour les fibres de 30 mm (résistance d'autant plus forte que les fibres sont de bonne propriétés mécaniques).

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.

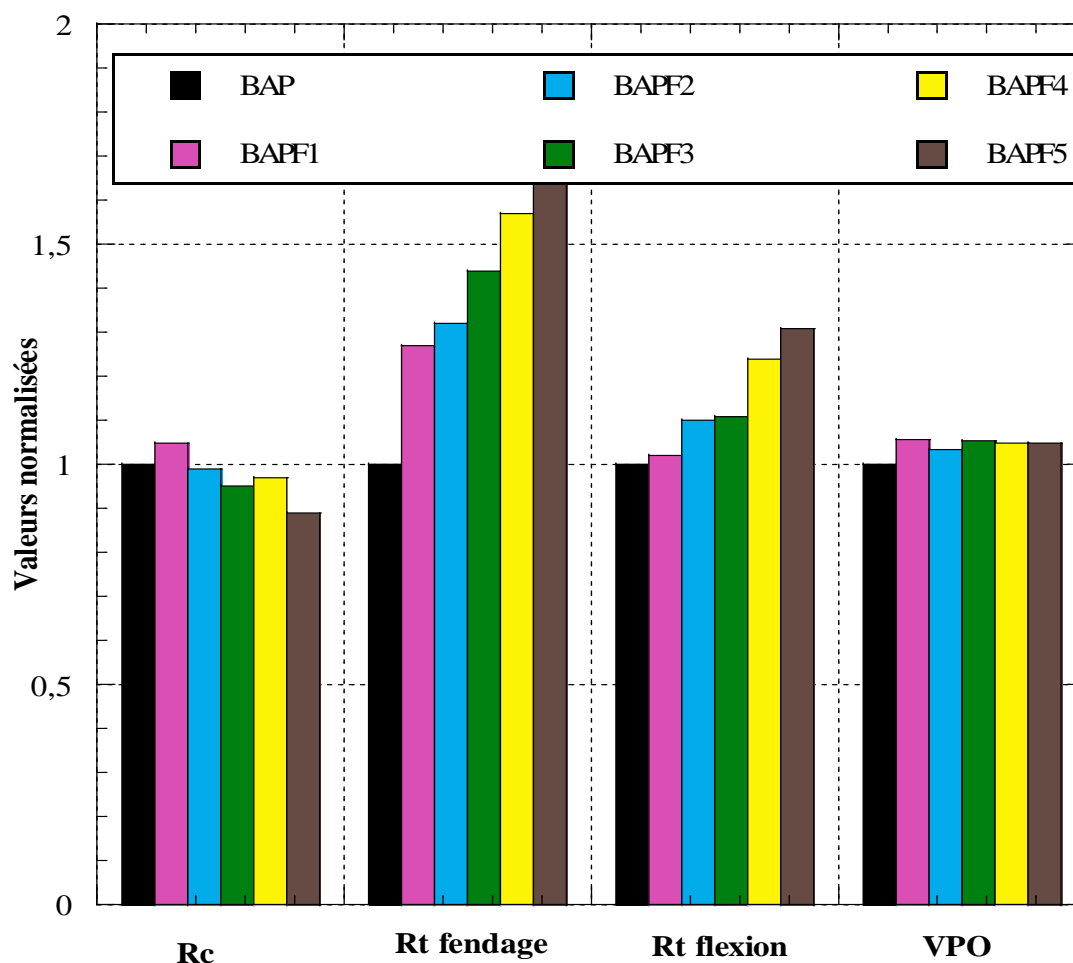


Fig. VII-40 – Évaluation des propriétés physico-mécaniques des BAP et BAPF.

La vitesse de propagation d'ondes (VPO) est une mesure non destructive qui vise à examiner la structure interne du béton, c'est-à-dire la présence des vides et fissures. En effet, la présence des vides et fissures réduit la VPO et par conséquent la qualité du béton.

Les valeurs de la vitesse de propagation d'ondes des BAP et BAPF comportant différents dosages et combinaisons de fibres à crochets et ondulées sont présentées sur la figure VII-39, d'après ces valeurs, on constate, pour tous les BAP et BAPF une légère augmentation des vitesses de propagation d'ondes avec l'introduction des fibres. On remarque aussi que la composition de référence BAP est celle qui présente la plus faible valeur, la plus grande valeur est celle du BAPF2 cette augmentation est apparente parce que les fibres à crochets présentent une masse volumique élevée par rapport à celle du béton.

Leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou).

Pour les 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 [130].

CONCLUSION.

Bien que la relation existante entre les propriétés rhéologiques et le taux de fibres soit incontournable d'autres facteurs peuvent influencer ce comportement parmi eux la nature des additions minérales utilisées et celle des fibres utilisées. La géométrie des fibres ainsi que le dosage de ces dernières jouent un rôle important sur le comportement rhéologique du mélange. L'utilisation des fibres de forme ondulée et courte en substitution avec les fibres longues a amélioré l'ouvrabilité. Ceci montre la possibilité d'élaborer des bétons autoplaçants à base de fibres ondulées en présence d'ajout cimentaire poudre de marbre.

Dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, dans un premier temps, un seul type de fibre a été utilisé, présentant une ondulation et une surface spécifique importante. Les résultats de la caractérisation mécanique ont démontré la capacité de ce type de fibre à limiter la microfissuration en raison de la force de liaison significative avec la matrice développée par les fibres. Par la suite, ces fibres ont été mélangées avec des fibres présentant un ancrage aux extrémités et longues les rendant efficaces au stade de la macro-fissuration. L'idée de ce fibrage hybride est venue pour la complémentarité que peuvent apporter ces deux types de fibre vis-à-vis de la dissipation d'énergie. Un autre intérêt important associé à l'incorporation des fibres ondulées est que ces fibres sont moins chères et disponibles.

A partir des résultats en traction par flexion et/ ou par fendage, il a été confirmé que les fibres ondulées agissent efficacement sur la micro-fissuration, en redistribuant la fissuration et en retardant sa localisation, alors que les fibres à crochets interviennent positivement sur la macro-fissuration par leur capacité de pontage. Le fibrage hybride bénéficie simultanément des deux effets.

VII.11. CARACTERISATION DES PERFORMANCES D'UN BETON AUTOPLAÇANT RENFORCE DE DIFFERENTS TYPES DE FIBRES.

On se propose dans cette partie d'étudier les propriétés rhéologiques et mécaniques des différents mélanges de bétons autoplaçants fibrés, dans le but de mettre en évidence la contribution de l'hybridation des fines et des fibres de différentes natures à l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques. L'association de fibres et d'ajouts de différentes caractéristiques sont peu utilisés dans la littérature.

VII.11.1. Compositions optimisées.

Tenant compte des résultats d'études présentées aux paragraphes précédents et des paramètres de composition prépondérants mis en évidence et vérifiés aux cours des essais de validation, on présente les différentes formulations optimisées dans le Tableau VII-9.

Tableau VII-9 – Différentes compositions des BAP et BAPF d'un mètre cube de béton.

		Les dosages (Kg/m3)										
		Ciment	Addition	L'eau	E/L	Sable		Gravillon	SP	fibres		
						Sr	Sd			Fibres métalliques (FM)	Fibres de verres (FV)	Fibres de polypropylène (FP)
BAP1	BAP-30%PM	350	150	170	0,34	610	173	790	7.9	0.0	0.0	0.0
BAP2	BAP -30 % MK	350	150	170	0,34	645	191	790	7.9	0.0	0.0	0.0
BAP3	BAP -30 % FC	350	150	170	0,34	706	202	790	8.5	0.0	0.0	0.0
BAPF1	BAPF -30 % PM+FM	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	60	0.0	0.0
BAPF2	BAPF -30 % MP+FM+FP	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	59.4	0.6	0.0
BAPF3	BAPF -30 % PM+FM+FV	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	54.4	0.0	5.6
BAPF4	BAPF -30 % MK+FM	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	60	0.0	0.0
BAPF5	BAPF -30 % MK+ FM+FP	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	59.4	0.6	0.0
BAPF6	BAPF -30 % MK+ FM+FV	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	54.4	0.0	5.6
BAPF7	BAPF -30 % FC+ FM	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	60	0.0	0.0
BAPF8	BAPF -30 % FC+ FM+FP	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	59.4	0.6	0.0
BAPF9	BAPF -30 % FC+ FM+FV	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	54.4	0.0	5.6
BAPF10	BAPF -20 % PM+10 % MK+ FM	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	60	0.0	0.0
BAPF11	BAPF- 20 % PM+10 MK+ FM+FP	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	59.4	0.6	0.0
BAPF12	BAPF -20 % PM+10 % MK+ FM+FV	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	54.4	0.0	5.6
BAPF13	BAPF -20 % PM+10 % FS+ FM	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	60	0.0	0.0
BAPF14	BAPF -20 % PM+10 % FS+ FM+FP	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	59.4	0.6	0.0
BAPF15	BAPF -20 % PM+10 % FS+ FM+FV	350	150	170	0,34	586	245	717	8.5	54.4	0.0	5.6

VII.11.2. Effet des fibres et des ajouts cimentaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP

Dans la plupart des cas, les bétons autoplaçants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un type de fibre. L'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes et des dosages appropriés peut potentiellement non seulement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant, mais peut aussi contribuer à un gain conséquent de fibres. La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation ou mixage est étudiée dans cette partie pour des bétons autoplaçants avec ajouts de différentes natures (quasi-inertes et actives). Des mélanges mixtes ou hybrides ont été formulés avec des ajouts cimentaires en substitutions partielle avec le ciment et des fibres métalliques, de verre et de polypropylène de différentes longueurs et dosages. Des essais à l'état frais et durcis ont été réalisés et les résultats ont été intensivement analysés afin d'évaluer l'effet de l'hybridation sur les bétons autoplaçants avec des ciments binaires et ternaires. Se basant sur divers arrangements (combinaisons), l'étude met en évidence l'aspect quantitatif des fibres pour améliorer les performances du composite BAP fibré.

Les résultats trouvés à l'état frais sont récapitulés dans le tableau VII-10

Tableau VII-10 – Différentes compositions des BAP et BAPF d'un mètre cube de béton.

No	Compositions	Étalement (cm)	Boite en L	Stabilité au tamis (%)
BAP1	BAP-30 % PM	75	0.89	05.59
BAP2	BAP -30 % MK	68	0.84	06.65
BAP3	BAP -30 % FC	77	0.88	06.32
BAPF1	BAPF -30 % PM+FM	70.5	0.80	04.13
BAPF2	BAPF -30 % PM+FM+FP	73	0.83	04.96
BAPF3	BAPF -30 % PM+FM+FV	71.3	0.81	04.47
BAPF4	BAPF -30 % MK+FM	65.5	0.79	03.85
BAPF5	BAPF -30 % MK+ FM+FP	68.5	0.80	03.72
BAPF6	BAPF -30 % MK+ FM+FV	69	0.80	03.87
BAPF7	BAPF -30 % FC+ FM	72	0.84	06.76
BAPF8	BAPF -30 % FC+ FM+FP	69	0.81	06.01
BAPF9	BAPF -30 % FC+ FM+FV	67	0.83	06.85
BAPF10	BAPF -20 % PM+10 % MK+ FM	69	0.79	4.12
BAPF11	BAPF 20 % PM+10 % MK+ FM+FP	70.3	0.81	3.95
BAPF12	BAPF -20 % PM+10 % MK+ FM+FV	70	0.80	3.62
BAPF13	BAPF -20 % PM+10 % FS+ FM	66	0.78	4.69
BAPF14	BAPF -20%MP+10FS+ FM+FP	68	0.80	4.12
BAPF15	BAPF -20 % PM+10 % FS+ FM+FV	69	0.79	3.96

Effet des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.

Le tableau VII-10, fournit les résultats à l'état frais des différents BAP. On remarque que toutes les formules de BAP donnent un étalement supérieur à 600 mm. On conclut que ces bétons sont caractérisés par une bonne mobilité dans les milieux non confinés, la mobilité des matériaux dans un milieu confiné est mesurée par la boîte en L (≥ 0.8) ou on remarque un taux de remplissage suffisant. La stabilité au tamis est convenable ($\leq 15\%$) ce qui est la caractéristique d'un béton non ségrégeable. On remarque que les ajouts utilisés qui sont compatibles avec l'adjuvant ont bien réussi à disperser les granulats et en conséquences, ils

donnent un bon étalement, un bon taux de remplissage et une bonne stabilité au tamis, ces combinaisons de fillers et de fibres ouvrent plus d'horizon quant à leur utilisation dans les BAP.

La substitution du ciment par la poudre de marbre et le calcaire a conduit à une diminution de la quantité d'eau consommée par les réactions d'hydratation, ce qui résulte une quantité d'eau libre plus grande, raison pour laquelle la déformabilité augmente cas de BAP1 et BAP2. Pour les fibres, la nature et le type des fibres n'affectent pas vraiment les propriétés rhéologiques du BAP et on peut obtenir un très bon étalement avec une meilleure stabilité au tamis mais à des pourcentages appropriés (cas de 0.8%). La comparaison entre le béton de fibres métalliques et le béton mixte de fibres de polypropylène ou verre et de fibres métalliques nous mène à conclure que l'hybridation a présenté de meilleurs propriétés rhéologiques et ce grâce aux propriétés des fibres synthétiques qui n'affectent pas l'autoplaçance à des dosages bien déterminés.

Comme on peut justifier l'augmentation de la déformabilité des bétons sans fibres par la finesse de la poudre de marbre, du calcaire, de la fumée de silice et du métakaolin qui est élevée par rapport à celle du ciment. Cette finesse, qui améliore la granulométrie et la compacité, contribue de manière significative à l'amélioration de la rhéologie et la stabilité des bétons [131, 132].

Effet des fibres sur les propriétés mécaniques des BAP.

Les propriétés des bétons autoplaçants bi-fibrés sont mesurées et comparées aux propriétés des BAP sans fibres et des BAP contenant des fibres métalliques. Cette étude permet de distinguer l'apport des fibres de verre et de polypropylène en combinaison avec les fibres métalliques en présence de différents types d'ajouts.

- **Effet des fibres sur la résistance à la compression des BAP.**

La figure VII-40 montre l'évolution de la résistance à la compression des BAP avec fibres mixtes en fonction de l'âge. Les différents teneurs en fibres ne changent pas la cinétique du gain de résistance en compression. De légères améliorations de résistance se remarquent selon le dosage en fibres et leurs élancements.

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité [133] Les résultats mis en évidence dans cette partie sur l'effet de différents types de fibres en combinaisons avec différents types d'ajouts sur la résistance à la compression du béton autoplaçant renforcé de fibres montrent quelques divergences avec la littérature. Cependant, on est d'accord pour dire que les fibres apportent une légère amélioration en compression de l'ordre de 8%. L'évolution de la résistance est due à l'orientation des fibres qui s'oppose à la propagation des fissures. Il a été montré qu'en compression les fibres courtes (fibres de polypropylènes et les fibres de verre) interviennent au niveau des microfissures et les fibres longues (fibres métalliques) interviennent au niveau des microfissures obliques et verticales. Ce concours se traduit surtout par une élévation des

frottements entre les lèvres des macrofissures, frottements qui peuvent conduire à un gain apparent de résistance à la compression, alors qu'il s'agit d'une amélioration de la capacité portante de l'éprouvette.

Enfin, il faut rappeler l'influence de l'hybridation des fibres. Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum. Les essais en compression ont montré que l'association des fibres courtes et longues apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de l'effort maximal appliqué.

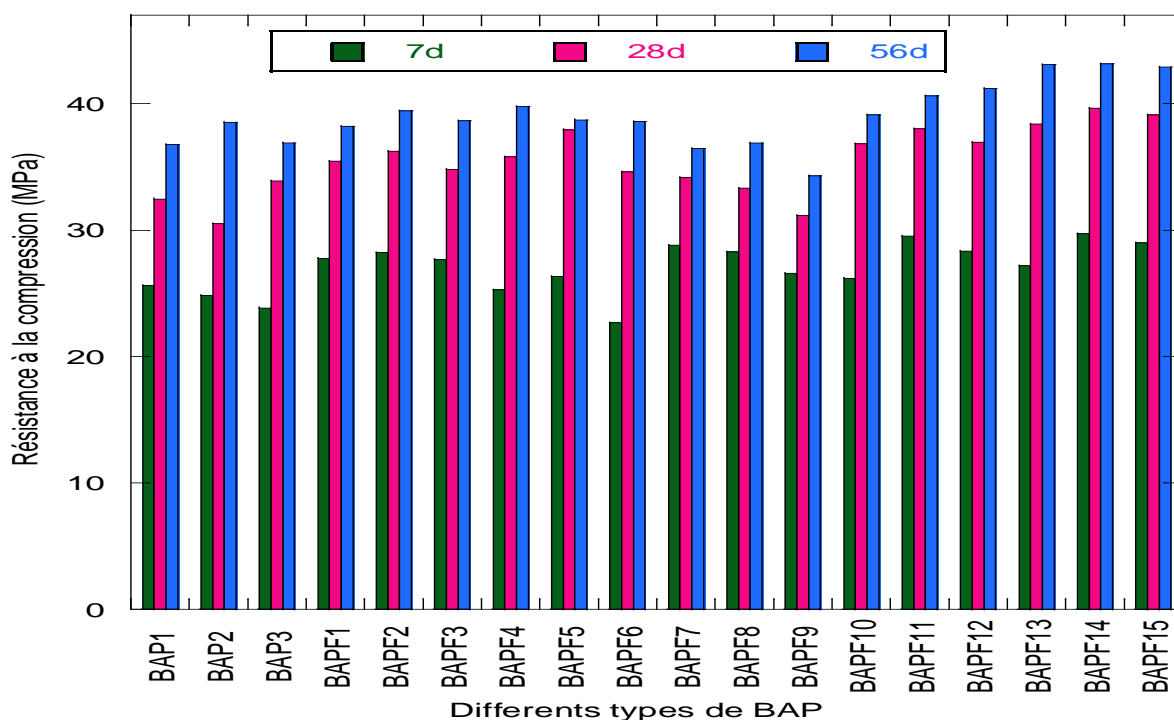


Fig. VII-41 – Effet de différents types de fibres sur la résistance à la compression

- **Effet des fibres sur la résistance à la traction par flexion des BAP.**

L'introduction des fibres métalliques, de polypropylène et de verre dans les bétons autoplaçants a pour objectif de contrôler la fissuration. En effet, le rôle des fibres est de reprendre des efforts de traction au sein de la matrice cimentaire afin de retarder l'initiation puis la propagation des fissures. Les fibres peuvent ainsi augmenter la résistance à la traction des bétons autoplaçants. Dans ces bétons, l'orientation perpendiculaire des fissures aux interfaces matrice-granulats devrait permettre aux fibres d'agir efficacement.

Dans cette partie on distingue trois principaux types de fibres : les fibres métalliques, fibres de verre et les fibres synthétiques (polypropylène). Ces fibres jouent un rôle principal dans le processus de fissuration du béton qui comporte trois étapes : la microfissuration, la localisation et la propagation des fissures menant à la rupture.

L'avantage majeur que procurent les fibres métalliques, réside sans aucun doute dans le fait qu'elles permettent d'accroître de façon significative la résistance à la traction par flexion.

L'élaboration du concept de fibrage mixte ou hybride a permis d'aboutir à une initiation à la compréhension de l'intervention des fibres dans les différentes étapes du processus de fissuration en traction d'un béton autoplaçant fibré. Durant les 02 étapes de fissuration évoquées précédemment les fibres interviennent selon un concept qui peut se résumer ainsi :

Durant la phase de microfissuration, les fibres de polypropylène et de verre peuvent couvrir les microfissures actives et retarder l'apparition des microfissures. On observe alors une augmentation de la capacité portante à l'échelle du béton.

Durant la phase de propagation des macrofissures actives, les fibres métalliques peuvent également couvrir ces macrofissures, assurant, ainsi, une ductilité plus grande.

Il est bien évident que, dans la plupart des cas, la géométrie optimale de la fibre qu'il faut utiliser pour agir sur la micro ou la macro-fissuration active sera différente. En effet, dans le cas où les fibres doivent agir sur les microfissures, il est nécessaire que ces fibres soient nombreuses et de petit diamètre (fibres de verre et de polypropylène). Pour des raisons de maniabilité (propriétés rhéologiques) du béton autoplaçant, fortement liée au rapport longueur/diamètre de la fibre, les fibres devront également être relativement courtes.

Dans le cas où l'on veut que les fibres agissent sur les macrofissures, la longueur de la fibre doit être suffisamment grande, comme c'est le cas des fibres métalliques ($l=50\text{mm}$), afin d'assurer un ancrage suffisant de celle-ci dans la matrice. Pour les mêmes raisons de maniabilité, les fibres longues ne pourront s'utiliser qu'en pourcentage optimale.

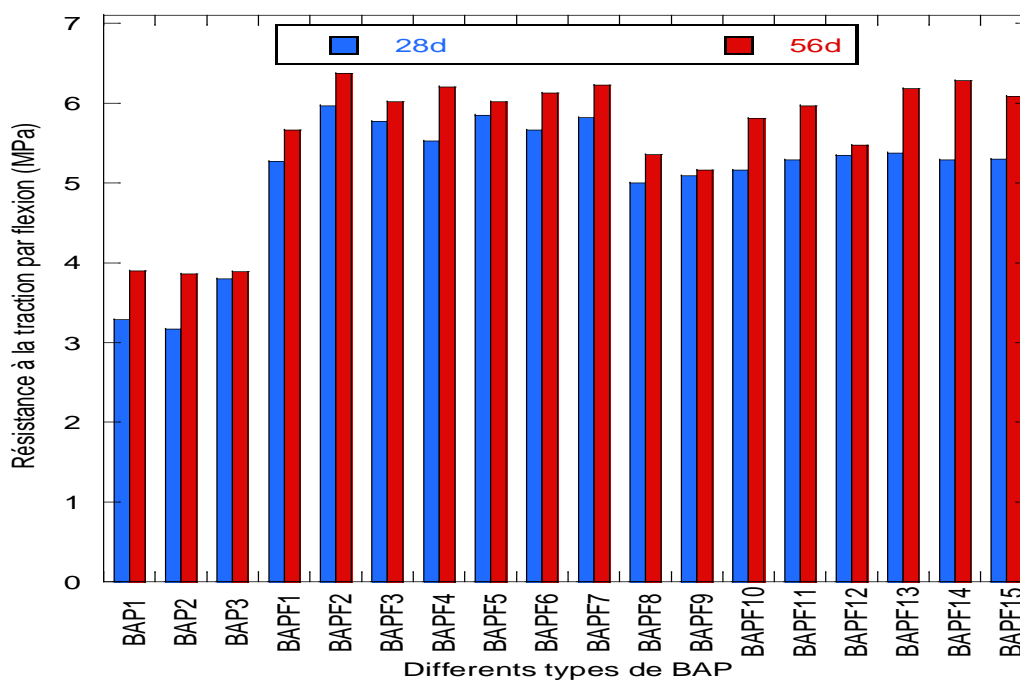


Fig. VII-42 – Effet de différents types de fibres sur la résistance à la traction par flexion

• **Effet des fibres sur la vitesse de propagation de l'onde sonore à travers les BAP.**



Fig. VII-43 – Effet des différents types de fibres sur la vitesse de propagation de l'onde sonore

De la figure VII-42 on constate que les vitesses de propagation d'ondes, pour un dosage de 0.8% de fibres, sont légèrement améliorées (environ 2%) par rapport aux bétons sans fibres et aux bétons bi-fibrés, cette augmentation affirme que l'effet des fibres métalliques est plus supérieur.

CONCLUSION.

Le but de la présente partie est de comparer le comportement rhéologiques et mécaniques du béton avec un ciment binaire et ternaire contenant à la fois des fibres de polypropylène et des fibres métalliques, des fibres de verre et des fibres métalliques à ceux du béton avec des fibres métalliques et ceux sans fibres.

Les avantages obtenus par l'addition des ajouts cimentaires et des fibres à la formulation d'un béton autoplaçant varient en fonction des matériaux utilisés. Toutefois, ils possèdent tous un point commun. Ils améliorent la résistance tout en produisant un béton plus compact et ductile.

L'emploi des ajouts cimentaires au BAP permet d'améliorer les résistances en compression à court et long termes. L'accroissement des résistances à court terme est surtout notable pour les BAP avec ajout de poudre de marbre et fillers calcaires ce qui peut justifier son emploi pour les BAP nécessitant de hautes résistances à court terme. Cependant, l'augmentation des résistances à plus longues échéances semble dépendre de la nature de l'addition. En effet les

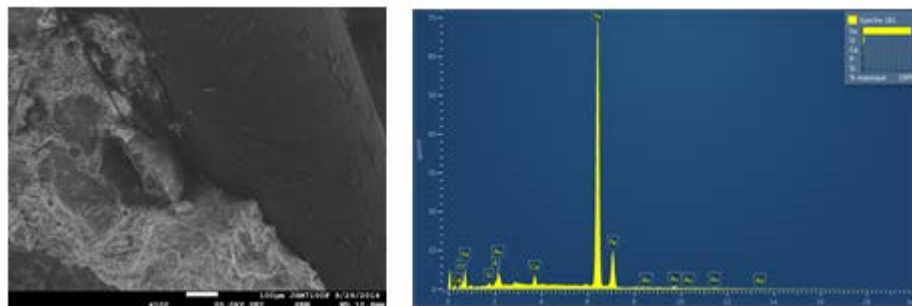
BAP ternaires avec addition de métakaolin et de fumée de silice qui se caractérisent par un pouvoir hydraulique, garantissent les meilleurs gains de résistance à long terme.

En général, l'utilisation des mélanges des fibres courtes et longues (métalliques ou synthétiques) est la solution la plus meilleure pour couvrir les fissures, les fibres courtes améliorent la ductilité et les fibres longues augmentent leur résistance à la rupture.

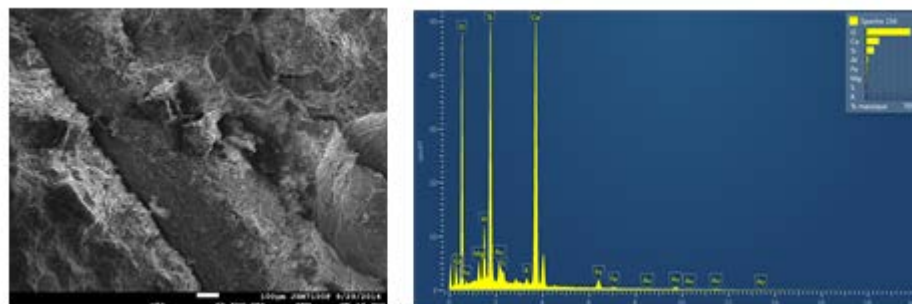
A la lumière des résultats obtenus on peut donc conclure que les propriétés des bétons autoplaçants fibrés à l'état frais ainsi qu'à l'état durci, dépendent de plusieurs paramètres, La nature d'ajout fin incorporé, nature et dosage des fibres ainsi que leurs élancements.

VII.12. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE.

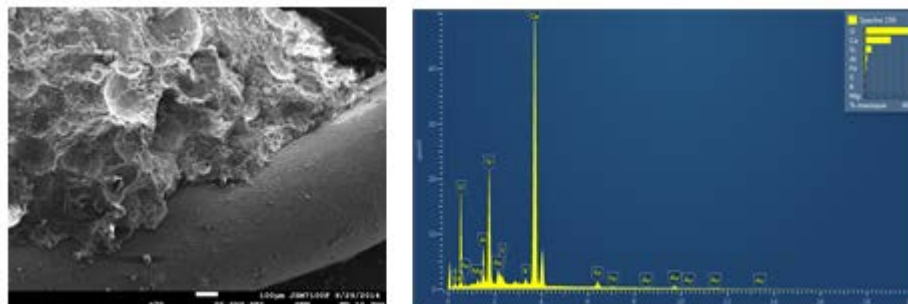
La microscopie électronique à balayage permet la réalisation d'une analyse élémentaire par détection de l'énergie des rayons X émis. Le fort grandissement et la profondeur de champ très importante de cette technique d'analyse permettent de former des images des surfaces rugueuses ou lisses avec un grand pouvoir de résolution. L'observation d'échantillons isolants nécessite une métallisation de l'échantillon qui permet de le relier à la masse avec une colle conductrice qui permet d'évacuer les charges et de la fixer sur le porte échantillon. L'appareil utilisé à l'INSA-Rennes, France, est un microscope électronique à balayage de marque Jeol (conventionnel JSM 6400), destiné à l'observation d'échantillons secs et conducteurs et à l'analyse par un spectromètre de dispersion d'énergie OXFORD Link Isis et couplé à une microanalyse et pratiquées sur des amas d'éprouvettes de béton durci. Les essais ont montré l'adhérence entre fibres de différentes natures et la matrice avec combinaison d'ajouts cimentaires ainsi que la microstructure interne de la matrice.



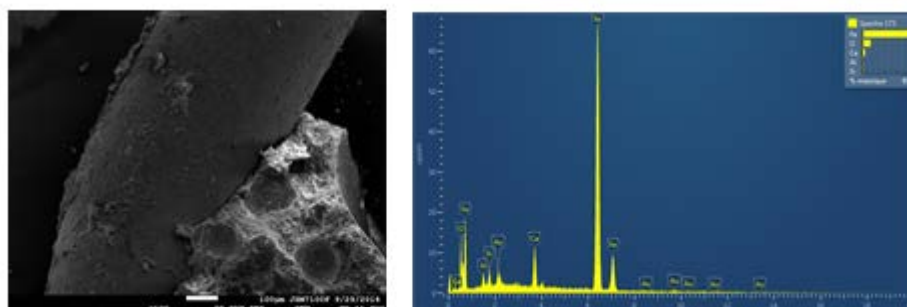
A) Marbre, Métakaolin et Fumée de silice – Fibres Métalliques



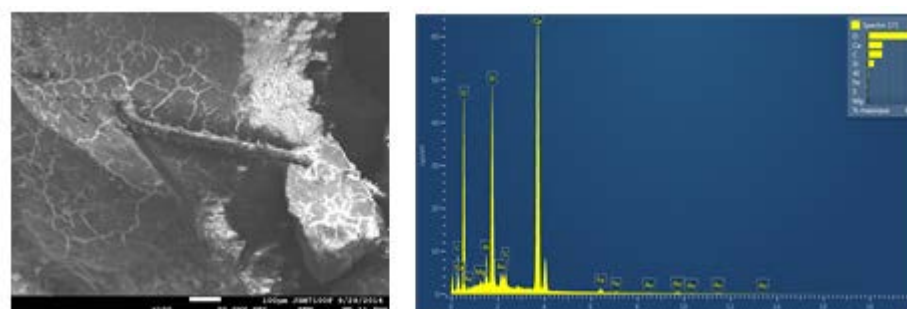
B) Marbre Métakaolin – Fibres Métalliques



C) Marbre et Fumée de silice – Fibres Métalliques



D) Marbre – Fibres Métalliques



E) Marbre – Fibres de Verre

La microstructure des liants durcis contenant de la poudre de marbre présente une structure homogène. Les silicates hydratés sont empilés et collés les uns aux autres et présentent des orientations multidirectionnelles. Leur faible microporosité est un frein à la formation de l'ettringite sous forme d'aiguilles [137].

On remarque que le béton autoplaçant fibré avec différents types d'ajouts à des surfaces spécifiques supérieures à celle du ciment ne présente pas de vides, la porosité est plus faible.

La présence de la fibre est nettement distincte dans les photos A, B, C, D, E, F. On peut noter que la forme de la fibre permet une bonne adhérence avec la matrice.

L'adhérence fibre – matrice est quasi parfaite. On observe également un décollement de la fibre due à l'opération de coupe mécanique de l'échantillon.

L'étude faite sur MEB, n'a pas été très approfondie, elle a été réalisée pour accompagner les résultats des essais de traction par flexion et se faire une idée de ce que subit un échantillon suivant le type de renfort utilisé.

CONCLUSION.

Les analyses microstructurales au MEB ont été menées pour évaluer l'homogénéité de la distribution des fibres, l'influence de leur présence sur les défauts microstructuraux et la qualité de l'interaction fibre/matrice.

Cette étude confirme le potentiel de l'utilisation des fibres de différente nature en tant que renfort de matrices cimentaires.

Conclusion Générale

Perspectives

Références Bibliographiques

CONCLUSION GENERALE

Le traitement des déchets c'est-à-dire les problèmes de transformation, de recyclage et d'utilisation, fait partie d'une part, d'un ensemble de travaux visant à l'amélioration de l'environnement et la lutte contre les nuisances et d'autre part, de l'utilisation rationnelle et économique de la matière et de l'énergie.

L'intérêt qui est porté à cette recherche est la valorisation des déchets de sous-produits industriels est lié à la fois à la crise d'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matière première et enfin à la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et de l'environnement.

Quant à l'environnement, nul n'ignore que la pollution de notre planète croit de la même façon que les demandes en énergie et en matière première.

De ce fait, il est nécessaire d'établir une loi relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. D'ici résulte l'obligation de sensibiliser les chercheurs et les futures ingénieurs aux problèmes des déchets.

La présente recherche s'inscrit dans le cadre de l'exploitation des matériaux locaux, y compris les éléments d'additions, pour la préparation des bétons autoplaçants économiques. Dans ce travail, nous avons étudié des BAP contenant un mélange binaire ternaire et quaternaire de poudre. En plus du ciment, le déchet industriel faisant l'objet de cette étude est la poudre de marbre. Cette dernière est disponible en Algérie et à des prix compétitifs.

Lorsque la pierre de marbre est transportée de la carrière de marbrier vers l'usine, elle est découpée en de petites pierres dépendant des dimensions de l'élément que le fabricant veut produire. Ces petites pierres sont ensuite façonnées et lustrées de telle manière à obtenir l'aspect recherché. Pendant ces opérations une quantité importante de marbre qui représente presque 20% à 30% des pierres utilisées au début devient des déchets qui seront rejetés par la suite dans la nature.

La confection de bétons autoplaçants (BAP) nécessite un grand volume d'addition minérale de manière à augmenter le volume de pâte permettant ainsi d'atteindre la fluidité qui fait le caractère autoplaçant

Les effets des additions minérales sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des BAP sont de grande importance pour un plus large usage de ces matériaux. Diverses études suggèrent que l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non au ciment affecte les propriétés du béton frais et durci.

Parmi les fillers non pouzzolaniques, les fillers poudre de marbre qui ne sont pas fréquemment utilisées dans des mélanges de BAP contrairement aux fillers calcaires.

Différents auteurs ont établi que les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais pour cette raison une comparaison entre BAP avec poudre de marbre et celle avec fillers calcaire est indispensable.

Sous la lumière des résultats des essais réalisés sur un ensemble de 80 compositions différentes il a été trouvé que :

A/ Sur l'optimisation des dosages en addition de poudre de marbre dans les BAP l'état frais et durci :

Le volume de pâte recommandé pour la formulation d'un BAP doit être de 330 à 400 l/m³ de béton correspondant à un dosage en poudre (ciment + addition) de l'ordre de 500 kg/m³ en moyenne. Une étude apparaissait donc importante afin de caractériser l'effet de l'addition, en fonction de sa nature et de son dosage, sur l'écoulement de la pâte en tant que phase prépondérante du BAP. Trois dosages d'addition 15, 20 et 30% de la masse du ciment ont été fixés comme ajout dans le béton autoplaçant.

L'étude préliminaire réalisée sur des bétons a permis de tirer les enseignements suivants :

- La poudre de marbre peut remplacer le calcaire avec succès ;
- Les demandes en superplastifiant du BAP avec poudre de marbre dépendent de la finesse de l'addition et de son dosage. Ainsi la poudre de marbre est caractérisée par des demandes en eau et en superplastifiant modérées par rapport au additions minérale actives tel que la fumée de silice ;
- La faisabilité d'un béton autoplaçant à base de poudre de marbre, à des dosages allant de 15 à 30% est envisageable ;
- L'étude a montré que la finesse (SSB = 7000 et 9000) des fillers poudre de marbre a peu d'effet sur la demande en superplastifiant et mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression allant jusqu'à 30%, particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton autoplaçant avec une finesse similaire à celle du ciment (SSB = 3000) avec les mêmes rapports eau/liant ;
- Pour le filler "PM" un dosage en superplastifiant de SP = 1,5% est à l'origine d'une mobilité moindre du béton à travers le ferrailage surtout avec une SSB trop élevée. D'autre part, quand SP > 1,75% la fluidité devient très importante et une ségrégation statique est détectée d'où ces compositions sont rejetés par L'AFGC. Par conséquent, un dosage en superplastifiant tel que 1,5% < SP < 1,75% conduit à des résultats satisfaisants en termes de mobilité du béton en milieu confiné et d'ouvrabilité ;
- L'incorporation de la poudre de marbre à un dosage de 30% par rapport à la masse du ciment comme ajout permet d'améliorer les propriétés rhéologiques, une amélioration de l'ordre de 10% ;
- Les résultats obtenus sur les paramètres d'ouvrabilité ne permettent pas de dégager de façon franche le dosage optimal des additions. En effet les paramètres d'ouvrabilité que sont le diamètre d'étalement, la boîte en L et la stabilité au tamis militent pour un dosage optimal en addition qui se rapprocherait plus de 20% que de 30%. Pour définir le dosage en addition adéquat il était intéressant de faire appel à un autre paramètre utile à notre démarche, il s'agit de la résistance mécanique en compression et en

traction par flexion. les essais sur les résistances mécaniques en compression et en traction par flexion ont permis d'apporter un argument supplémentaire validant plutôt un dosage de 30% en ajout ;

- Les additions minérales contribuent au remplissage des pores en plus de ce que l'hydratation du ciment seul peut apporter, par la formation d'hydrates lors de la prise et du durcissement. L'amélioration de la porosité du béton est d'autant plus importante que la finesse de la poudre de marbre est élevée ;
- Sur le plan physico-mécanique, la poudre de marbre réagit par sa finesse, engendrant ainsi un squelette plus cohérent, une peau de béton relativement plus imperméable et par conséquent un béton plus résistant. Il paraît intéressant, d'insister sur le fait que l'influence de la finesse de la poudre de marbre est d'autant plus significative, selon que l'on cherche à fabriquer des bétons plus performants ;
- L'emploi de la poudre de marbre en ajout au BAP permet d'améliorer les résistances en compression et en traction par flexion. L'accroissement des résistances à court terme est surtout notable pour les BAP avec un ajout dont la finesse de mouture est élevée ou l'ordre d'amélioration peut atteindre les 15% pour la résistance à la compression et 8% pour la traction par flexion ;
- L'incorporation de la poudre de marbre accélère la cinétique de durcissement pour tous les mélanges notamment à court terme par effet de surface ou de nucléation hétérogène cependant, la cinétique tient compte de la nature de l'addition. En effet, si le filler poudre de marbre accélère l'hydratation des BAP au jeune âge, son effet a tendance à se stabiliser à long terme ; de plus, l'augmentation du dosage en filler à une influence significative sur le développement des résistances, voire même, une diminution, pour un taux d'ajout supérieur à 30% ;
- À l'état durci, le remplacement partiel du ciment par de la poudre de marbre mène à une diminution des résistances à la compression et à la traction. L'examen du risque de ségrégation montre que tous les mélanges testés sont homogènes et répondent aux critères de l'autoplaçance.

La substitution partielle de la poudre de marbre dans les bétons autoplaçants par le métakaolin et la fumée de silice doit non seulement présenter de bonnes propriétés mécaniques à long terme mais aussi satisfaire les critères d'ouvrabilité du béton frais (étalement, taux de remplissage et stabilité). Afin de répondre à ces préoccupations, un programme expérimental a été mis en place pour comprendre et apporter des éléments de réponse aux questions posées qui ont constitué l'un des objectifs du présent travail. Plusieurs annotations ont été tirés :

- L'emploi des additions en ajout cimentaires au BAP permet d'améliorer les résistances en compression à court et long termes. L'accroissement des résistances à court terme est surtout remarquable pour les BAP avec ajout de poudre de marbre, une augmentation de 10% pour le Rc et 13% pour le Rtf ;
- Cependant, l'augmentation des résistances à plus longues échéances est assurée par l'emploi d'ajout cimentaire actif. En effet les BAP avec ciment ternaire et quaternaire, garantissent des résistances à long terme supérieures à celle du BAP avec addition de

poudre de marbre seule, une augmentation qui peut aller jusqu'à 15% pour le Rc et 30% pour le Rtf;

- Contrairement à la fumée de silice, le métakaolin est nouvellement introduit dans les matrices cimentaires, peu de travaux lui ont été consacrés. Cependant les résultats obtenus montrent plutôt un effet favorable conformément aux résultats de certains auteurs qui conviennent que le métakaolin entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre finement broyée ;
- Les modèles dérivés sont basés sur une approche de conception factorielle se sont révélés intéressants pour comprendre les interactions entre les différents paramètres du mélange. Ces modèles statistiques fournissent un moyen efficace pour évaluer l'influence et les effets des variables du mélange.

B/ Sur l'optimisation des dosages en fibres dans les BAP avec poudre de marbre à l'état frais et durci :

- Deux caractéristiques importantes de la fibre influencent fortement sur la maniabilité et les propriétés des bétons fibrés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci ce sont la fraction volumique et l'élancement de la fibre. L'augmentation de la fraction volumique et/ou de l'élancement de la fibre métallique réduit la maniabilité des bétons fibrés ;
- Pour une teneur donnée en fibres, les teneurs en superplastifiant et en filler gouvernent les propriétés d'homogénéité du mélange global. L'utilisation des bétons de fibres métalliques fait apparaître des blocages en écoulement confiné. La quantité de ce type de fibres devra donc déterminer celles du superplastifiant et de l'addition minérale ;
- les propriétés rhéologiques des BAP diminuent lorsque la surface des fibres augmente. On peut donc en conclure que, au-delà de la quantité des fibres dans le mélange, la longueur des fibres joue un rôle primordial sur les propriétés d'écoulement : plus cette longueur est importante, malgré une surface offerte au béton plus faible, plus des enchevêtrements entre les fibres ou entre les fibres et des obstacles sont susceptibles de se créer et de ralentir l'écoulement. Ce ralentissement peut ne pas être visible quel que soit le sens de l'écoulement ; et cela dépend notamment de la souplesse de la fibre qui lui permettra de s'orienter plus ou moins aisément ;
- Ce qui est important de mentionner pour l'essai de compression et de traction par flexion, est que le mode de rupture des éprouvettes fibrées a complètement été modifié. Il est passé d'un mode de rupture fragile pour le BAP sans fibres, où l'éprouvette est complètement rompue en deux, à une rupture progressive et ductile où l'éprouvette reste en un seul morceau, difficile à casser. Cela traduit le rôle mécanique de la fibre qui est activé après apparition des fissures ;
- La résistance à la compression n'est pas affectée par l'ajout de fibres, qui peuvent même avoir un effet positif sur cette propriété mécanique. Dans notre étude les fibres ont augmenté légèrement la résistance à la compression pour une longueur de 50 mm ;
- Les fibres courtes de 3 cm sont plus efficaces pour couvrir les microfissures. Quant aux macrofissures, ces fibres s'avèrent moins performantes.

- Les fibres longues de 5 cm se montrent plus efficaces pour les macrofissures ;
- L'utilisation de fibres courtes permettrait avec le même taux de renforcement d'augmenter le nombre de fibres dans la matrice et donc d'assurer un contrôle plus généralisé de la fissuration et améliorer la ductilité du matériau ;
- En ce qui concerne les BAP bi-fibrés, on a pu, en fonction de la géométrie et de la nature des fibres employées, formuler un béton répondant aux critères rhéologiques fixés, ce qui confirme aussi l'intérêt de la substitution des fibres longues par des fibres courtes tout en améliorant les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants ;
- Les propriétés mécaniques et rhéologiques sont plus favorables, avec les fibres métalliques en combinaison avec les fibres polypropylène relativement courtes ;
- Les résultats obtenus sur les bétons bi-fibrés confirment l'intérêt de la substitution des fibres métalliques par des fibres synthétiques tout en améliorant les propriétés rhéologiques et mécaniques.

PERSPECTIVES

Le filler calcaire et la fumée de silice sont des produits normalisés et fréquemment utilisés dans les ciments et les bétons autoplaçants. La poudre de marbre est un matériau nouvellement introduit dans les matériaux à matrice cimentaire. Peu de travaux sont conduits sur ce matériau malgré les multiples avantages qu'il présente notamment économiques, écologiques et techniques.

Sur le plan économique, dans certains pays, comme la Turquie par exemple qui dispose de circuit de récupération, ce qui n'est pas le cas de l'Algérie, le recyclage de la poudre de marbre n'a pas encore vu le jour.

Sur le plan écologique, la mise en décharge des déchets de poudre de marbre peut constituer une forte pollution.

Alors que sur le plan technique la poudre de marbre peut remplacer avec succès les fillers calcaires.

Les travaux qui ont été réalisés ont permis d'apporter quelques éléments de réponses aux préoccupations posées, mais ils ont soulevé aussi quelques points intéressants à explorer à l'avenir.

Afin de mieux comprendre les différentes facettes du comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci tel que : la durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, autres comportements mécaniques que la résistance à la compression et traction comme la résistance au gel/dégel, la fatigue ou encore l'endommagement.

De plus, des études sur la microstructure doivent être approfondies, afin de confirmer la faisabilité de ce type de béton dans le domaine de construction.

REFERENCES **BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] OKAMURA H, OUCHI M., “Self-compacting concrete. Development present use and future”, First International RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publication s.a.r.l, 3-14, 1999.
- [2] NOOR MA, UOMOTO T., “Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete”, First International RILEM symposium on self- compacting concrete, RILEM Publications s.a.r.l, 35-46, 1999.
- [3] BENSEBTI S.E, “Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux”, Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2008.
- [4] ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL, “ Recommandations pour l’ emploi des Betons autoplaçants ” ,2008.
- [5] SEDRAN T, DE LARRARD F, “Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, Logiciel d'optimisation granulaire ”, version 6.1d. LCPC, 2000.
- [6] TURCRY PH, “Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation”, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.
- [7] WALRAVEN, “Structural aspect of self-compacting concrete”, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 15-22, août 2003.
- [8] MENAI KH, “Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants”, Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées. Spécialité: Génie Civil, Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre1995.
- [9] OKAMURA H, OUCHI M, “Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol, 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [10] SEDRAN T, “Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants”, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, mars 1999.
- [11] KHAYAT K H, “Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete”, ACI Materials Journal, V. 96, No. 3, May-June 1999.
- [12] NAGATAKI S, FUJIWARA H, “Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete”, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas, ACI SP 154-16, pp 301-314, June 1995.
- [13] NECIRA B, GUETTALA A, CHABI S, “Formulation des bétons autoplaçants : effet des ajouts minéraux et des adjuvants”, Doctorat d’État, Université de Biskra, Algérie.
- [14] SAMARA M, ROZIERE E, KHOKHAR M, LOUKILI A, “Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants”, Projet ANR-RGCU SEDIBET, 2007.

- [15] AYED K, VIDAL T, PONS G, BENAÏSSA A, "Influence du type d'addition minérales sur les déformations différées des bétons autoplaçants", Thèse INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 2006.
- [16] REBOUH N, "Formulation et caractérisation d'un béton autoplaçant", Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [17] EL HILALI A, E.GHORBEL E, GONNON P, "Influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants", Université de Cergy-Pontoise, France, 2005.
- [18] BOUHAMOU N, BELAS N, MEBROUKI A, MESBAH H, AMMAR Y, "Étude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux", Doctorat d'État, Université de Mostaganem, Algérie, 2004.
- [19] HADDAD O, AGGOUN S, CABRILLAC R, « Influence des addition minérales sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants », Université de Cergy-Pontoise, France, 2003.
- [20] MEBROUKI A, BELAS N, BOUHAMOU N, « Contribution à la formulation d'une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux », Université de Mostaganem, 2007.
- [21] NEHDI M, "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669, June 2000.
- [22] GHEZAL A, « Modélisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation », Mémoire de maîtrise en génie civil, Université de Sherbrooke, pp 88-889, pp 155-156, 1999.
- [23] HASNI L, « Bétons Autoplaçants », Synthèse Bibliographique Rapport de Recherche N°. 98-004 /98-006, CEBTP, Juillet 1999.
- [24] KAZUHIRA et al, "Performance of new Developed Powder Polycarboxylic Acid Superplasticizer", RILEM, Proceeding Pro7 - Stockholm, Sweden, ed. A. Skarendahi and Peterson, pp 425-436.
- [25] KHAYAT K, « Les Bétons Autonivelants », Les Bétons : Bases et Données pour leur Formulation, Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, Sous la Direction de J. BARON et J-P OLLIVIER, Edition Eyrolles, Paris, Troisième Tirage 1999.
- [26] YURUGI M, SAKATA N, IWAI M, SAKAI G, "Mix Proportion for highly Workable Concrete" Conference Concrete, Dundee. 7-9 .p 9, 2000.
- [27] MIURA N, TAKKDA N, CHIKAMATSU R, SOGO S, "Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions» ACI SP 140,"High performance concrete in severe environments", Detroit, p. 163-186, 1993.
- [28] UTSI S, EMBORG M, CARSWARD J, "Relation with workability and rheological parameters", herd international RILM symposium on self-compacting concrete, RILEM publication SARL, P.311-22, 2003.
- [29] DHONDE HB, YO MO, TCC HSU, VOGEL J, "Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber reinforced concrete", ACI Mater J, 104:491-500, 2007.

- [30] GROTH P, “ Fiber reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders”, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, 2000.
- [31] PEIFFER G. « Les composites à matrice cimentaire renforcés de fibres FIBRAFLEX Documentation du Centre de Recherche de Pont à Mousson. 1991.
- [32] PEIFFER G. « Mechanical effectiveness ribbon-shaped fibers when used in fibers reinforced concrete ». Centre de Recherche de Pont à Mousson. 1991.
- [33] GRÜNEWALD S, “Performance-based design of self-compacting fiber reinforced concrete“, these de doctorat, University Darmstadt, Allemagne.
- [34] ROSSI P, HARROUCHE N, “Mix design and mechanical behavior of some steel-fiber-reinforced concretes used in reinforced concrete structures”, *Materials and Structures*, Vol. 23, pp. 256-266, 1990.
- [35] CHEN L, MINDESS S, MORGAN D R., SHAH S P, JOHNSTON C D, PIGEON M. (1995) “Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete”, ACI, SP-155, Editors, STEVENS D J, BANTHIA N, GOPALARATHAM V S, TATNALL P C, Michigan, p 41-69.
- [36] KHAYAT K.H, ROUSSEL Y (Jul., 2000) “Testing and Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete”, *Materials and Structures Journal*, vol. 33, p. 391-397.
- [37] MUELLER T, and HOLSCHEMACHER, K., (Jun., 2009) “Self-compacting Steel Fibre Reinforced Concrete – A Study about the Influence of Fibre Content and Concrete Composition”, 2nd International RILEM Symposium on Design, Performance and Use of Self- Consolidating Concrete SCC’2009, China, Edition Shi, C.; Yu, Z.; Khayat, K.H.; and Yan, P. p. 152-161.
- [38] GAO J, SUN W, MORINO K. (1997) “Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced High-Strength, Lightweight Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, n° 4, p. 307- 313.
- [39] YADEGARAN I, MAHOUTIAN M., SHEKARCHI M, LIBRE N A. (2007) “Effect of Polypropylene Fibers on Shrinkage of Self-Compacting Concrete”, 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium vol. 2, p. 707-713.
- [40] DREUX J, FESTA, J. (Mai, 2002) « Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants », 8° édition, Eyrolles, Paris, France.
- [41] SAHMARAN M, YURTSEVEN A, YAMAN I.-O. (Dec., 2005) “Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete”, *Building and Environment Journal*, vol. 40, n° 12, p. 1672–1677.
- [42] BANTHIA N, DUBEY A (2000a) “Measurement of Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete Using a Novel Technique”—Part 2: Performance of Various Composites, *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 1, p. 3-11.
- [43] ZHANG M H, CHEVRIER R L, MALHOTRA V M, MIRZA J (1997.) “ Use of High- Volume Fly Ash in Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete for Shotcrete Applications” *CANMET - Durability of concrete*, Proceedings 4th International Conference, MALHOTRA V. M., Sydney, Australia, p. 681-722.

- [44] AHMAD S H, SHAH S.P (Nov, 1982) “Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement”, ACI Journal, vol. 79, n° 6, p. 484-490.
- [45] BALAGURU P N, SHAH S P (1992) “Fiber Reinforced Cement Composites”, McGraw-Hill, Inc., 530 p.
- [46] LUO X, SUN W, CHAN S Y N (Apr., 2001) “Steel Fiber Reinforced High-Performance Concrete: a Study on the Mechanical Properties and Resistance Against Impact”, Materials and Structures, vol. 34, n° 3, p. 144-149.
- [47] GRÜNEWALD S, WALRAVEN J C, “ Rheological study on the workability of fiber-reinforced mortar”, Second Int. Symposium on SCC, Edited by Ozawa and Ouchi, University of Tokyo, COMS Engineering Publication, pp. 127-136, 2001.
- [48] GRÜNEWALD S, WALRAVEN J C, “ Maximum content of steel fibers in self-compacting concrete”, Second Int. Symposium on SCC, Edited by Ozawa and Ouchi, University of Tokyo, COMS Engineering Publication, pp. 137-146, 2001.
- [49] GROTH P, “Steel Fiber Reinforced SCC, Final report of task 6”, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc, 2000.
- [50] DING Y, LIU S, ZHANGY, THOMAS A, “The investigation on the workability of fiber cocktail reinforced self-compacting high performance concrete”. Construction and Building Materials. No.22 (2008) 1462-1470.
- [51] PETERSSON Ö, “Preliminary Mix Design - Final Report of Task 1”, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Document RT1_v2.doc, 1998.
- [52] GROTH P, NEMEGEER D, “ The use of steel fibers in self-compacting concrete”, First Int. Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Skarendahl and Petersson, RILEM publications PRO 7, Cachan, pp. 497-508, 1999.
- [53] TABET N. BENMOUNAH A. « Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres BAPF). Thèse Magister, Université de Boumerdès, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département génie des matériaux, 2012.
- [54] COTTERELL B, AI Y W, “Fracture Mechanics of Cementitious Materials”, Blackie Academic & Professional, London/Chapman and Hall, p. 294, 1996.
- [55] GRÜNEWALD, S. (2004) Performance-Based Design of Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 165 p.
- [56] GRÜNEWALD, S., WALRAVEN, J. C. (2001) Parameter-Study on the Influence of Steel Fibers and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, vol. 31, p. 1793-1798.

- [57] KHAYAT, K.H., ROUSSEL, Y. (Jul., 2000) Testing and Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete, *Materials and Structures Journal*, vol. 33, p. 391-397.
- [58] KASSIMI, F. (Sep., 2008) Optimisation and Mechanical and Structural Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete, M.Sc.A memory (in French), Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 205 p.
- [59] CHANVILLARD G, “Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d’acier tréfilées”, ancrées dans une matrice cimentaire. *Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d’art, OA12*, 1993.
- [60] OKAMURA H, OZAWA K, OUCHI M, “Self-compacting concrete. *Structural Concrete*”, (1):3_17, March 2000.
- [61] HAYAKAWA M, MATSUOKA Y, YOKOTA K, “Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan”, *Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20*, pp. 381-397, 1995.
- [62] PETERSSON Ö, BILLBERG P, VAN B K, “A model for SelfCompacting Concrete”, *International Rilem Conference on ‘Production methods and workability of concrete’, RILEM Proceedings 32*, 1996.
- [63] JIN, “Properties of mortar for self-compacting concrete”, PhD thesis de l’Université de Londres, 398 pages, 2002.
- [64] EDAMATSU, NISHIDA, OUCHI, “A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles”, *Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm*, pp 309-320.
- [65] VAN BUI, MONTGOMERY, “Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume”, *Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, Stockholm*, pp 373-384, 1999.
- [66] SEDRAN T, De LARRARD F, ANGOT D, «Prévision de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle », *Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 -*, Réf 3862, nov-déc 1994.
- [67] DE LARRARD F, HU C., and SEDRAN, T., “Best Packing and Specified Rheology: Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mix-Design”, *Adam Neville Symposium, Advances in Concrete Technology, Las Vegas, June, 1995*.
- [68] IGARASHI S, BENTUR A, KOVLER K, “Stresses and creep relaxation induced in restraining autogenous shrinkage of high-strength pastes and concretes”, *Advances in Cement Research*, 11:169_177, 1999.
- [69] IGARASHI S, BENTUR A, KOVLER K, “Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes”. *Cement and Concrete Research*, 30 :1701_1707, 2000.
- [70] SEDRAN T, DE LARRARD F, « Manuel d’utilisation de RENE-LCPC », *Logiciel d’optimisation granulaire, version 6.1d. LCPC*, 2000.

- [71] OZAWA K, MAEKAWA K, OKAMURA H, “The high performance concrete with high filling capacity”, Proceeding of the international symposium on admixtures for concrete, Held by RILM, Barcelone.p 51-62.
- [72] TRUDEL A, « Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance », Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées, Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Avril, 1996.
- [73] SEDRAN T, « Les Bétons Autonivelants (BAN) », Synthèse Bibliographique, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -196 -, Réf. 3889 mars-avr, 1995.
- [74] TURCRY P, LOUKILI A, « Différentes approches pour la formulation des bétons autoplaçants », influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques, Revue française de Génie Civil, vol. 7, n° 4, 2003.
- [75] UMEHARA H, JIRSA J O, « Shear strength and deterioration of short Reinforced concrete columns under cyclic deformations», PMFSEL Report N° 82-3, Dpt of civil engineering, University of texas at austin, Austin texas, , 256 pages, July 1982.
- [76] “SPECIFICATION AND GUIDELINES FOR SELF – COMPACTING CONCRETE”. EFNARC, February 2002.
- [77] ASSOCIATION FRANÇAISE DE GENIE CIVIL “Bétons auto-plaçants ”, Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques, juillet 2000.
- [78] BENKECHKACHE G, « Etude de comportement diffère des bétons autoplaçants Influence des paramètres de composition et de chargement », thèse de magister, Université Mentouri Constantine, novembre 2007.
- [79] DELARRARD F, LE ROY R, « Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », Matériaux et Constructions, 25, pp. 464-475, 1992.
- [80] [63] LE ROY R, DE LARRARD F, PONS G, « Calcul des déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances », Extension du domaine d’application des règlements de calcul BAEL/BPEL aux bétons à 80 MPa, Bulletin des LCPC, spécial XIX, pp.63-84, mai 1996.
- [81] GIBBS J C, and ZHU W, “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15, septembre 1999.
- [82] [65] SONEBI M and BARTOS P.J.M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.
- [83] PETERSSON Ö, BILLBERG P, VAN B.K, “A model for Self-Compacting Concrete”, International Rilem Conference on ‘Production methods and workability of concrete’, RILEM Proceedings 32, 1996.
- [84] FELEKOGLU B, YARDIMCI M. Y, BARADAN. B, “A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 446-456, 17-20, août 2003.

- [85] PAUW A, “Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density,” ACI JOURNAL, Proceedings V. 57, No. 6, Dec., pp. 679-687, 1960.
- [86] ACI 318-08, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”, American Concrete Institute ACI, Committee 318, 2008.
- [87] LYDON F. D, BALENDARN .R. V, “Some observations on elastic properties of plain concrete”, Cement and Concrete Research, 16, pp. 314-324, 1986.
- [88] DUARTE F., BUSTAMANTE V, “Evaluación de la Formulación para la predicción de la retracción”, Proyecto de Grado Universidad Nacional de Colombia Dirs, FRANCO J.S. y HERMIDA G. (En español), 2004.
- [89] BAZANT Z. P, BAWEJA S, “Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage. 2 Updating and theoretical basis” Materials and Structures, Vol.28, No.8 P.587-593, 1995.
- [90] ACI 209R-92, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”, En: Manual of Concrete Practice, Farmington Hills: American Concrete Institute, 2001.
- [91] HU C, et BARBIERI B, « Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d’un béton fluide traditionnel », Science des matériaux et propriétés des bétons, pp.265-272, 1ère Rencontre Internationale, Toulouse, 5-6 mars 1998.
- [92] PERSSON B, “ Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 239-250, 13-15 septembre 1999.
- [93] SAKATA K, “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, CONSEC 98, International Conference 2, pp.2057-2064, Tronso, GB, 1998.
- [94] SONEBI M, BARTOS P. J. M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, pp. 275-289, 13-15 septembre 1999.
- [95] NEVILLLE A M, “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [96] PONS G, PROUST E, ASSIE S, “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete,”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- [97] SAETTA A V, VITALIANI R V, “Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures” Part I: Theoretical formulation”. Cement and Concrete Research, 34, pp. 571-579, 2004.
- [98] CHAN S Y N, FENG N Q, TSANG M K C, “Durability of High Strength Concrete Incorporation Carrier Fluidiflying Agent” Magazine of Concrete Research, 52, No. 4. August, pp. 235-242.
- [99] TOPÇU I B, BILIR T, UYGUNOGLU T, “Effect of waste marble dust content as filler on properties of selfcompacting concrete”, Construction Building Materials, 23(5): 1947-53, 2009 .

- [100] GUNEYISI E, GESOGLU M, OZBAY E, “Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars”, *Materials and Structures*, 42: 813-26, 2009.
- [101] ERGUN A, “Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials*, 25: 806-12, 2011.
- [102] ARUNTAS H Y, GURU M, DAYI M, TEKIN I, “Utilization of waste marble dust as an additive in cement production”, *Materials and Design*, 31: 4039-42, 2010.
- [103] BOULKHLKHAL A, “ Rhéologie, caractérisation physico mécanique et durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre ”, Thèse de Magister, Université de Laghouat 2012.
- [104] BARON J, OLLIVIER J P, "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.
- [105] CHAID R, « Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux », thèse doctorale, Ecoles nationale Polytechnique, décembre 2006.
- [106] NEVILLE A.M, “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, ed. Paris Eyrolles, 2000.
- [107] AFNOR, NF P 18-502, “Water Absorption by capillary”, AFNOR, Paris, 1989.
- [108] BAEL 99, “ Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton arme suivant la méthode des états limites ”, fascicule N0 62 – Titre 1er – Section I, BAEL 91 révisé 99, avril 1999.
- [109] ACI, Building Code requirements for structural concrete (ACI 318-99) and commentary (ACI 318- R99). Reported by ACI Committee 318, 1999: 392pp.
- [110] GROTH P, “Fiber reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders”, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology, 2000.
- [111] YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y, “ Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio ”, *Cement and Concrete Research*, 35(3): 532–9, 2005.
- [112] GRANJU L M, SABATIER M, ALCANTARA, “Hybrid fiber reinforcement of ordinary or self-compacting concrete”, BEFIB, 20-22 Oct, Varenne, Italie, 2004.
- [113] BALAGURU P, NAJM H, “High performance fiber reinforced concrete mixture proportions with high fiber volume fractions”, *ACI Mater J*, 101, 281–6, 2004.
- [114] GRUNEWALD S, WALRAVEN J. C, “Parameter study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete”, *Cem Concr Res*, 31, 1793–8, 2001.
- [115] DEEB R, GHANBARI A, KARIHALOO B L, “Development of self-compacting high and ultra-high performance concretes with and without steel fibers”, *Cement and concrete composites*, 34, 185-190, 2012.

- [116] SHI Y, TANIGAWA Y, MORI H, KUROKAWA Y, “A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste”, Transactions of the Japan Concrete Institute, vol.20, n° 2, p.914, 1998.
- [117] PARK C K, NOH M H, PARK T H, ”Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures”, cement and concrete research, vol.35, n0 5, p 842-849, 2005
- [118] SONEBI M, BARTOS P J M, “ Hardened SCC and its bond with reinforcement ”, Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Sweden, 13-15 September, 275-89, 1999.
- [119] SAHMARAN M, CHRISTIANTO H A, YAMAN I O, “The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars”Cement and Concrete Composites 28(5): 432–40, 2006.
- [120] LANE R. O, BEST J F, “Properties and use of fly ash in Portland cement concrete”, Concrete International, 4(7): 81–92, 1982.
- [121] YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y, “Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ratio”, Cement and Concrete Research, 35(3): 532–9, 2005.
- [122] BUI V KBUI, MONTGOMERY D,“Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume”, In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM, 1999.
- [123] LIU M, “Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash”, Construction and Building Materials, 24:1245–52, 2010.
- [124] UYSAL M, SUMER M, “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures”, Construction and Building Materials, 25: 4112-20, 2010.
- [125] UYSAL M, YILMAZ K, “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Composites, 33: 771-6, 2011.
- [126] UYSAL M, YILMAZ K, IPEK M, “The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, 27(1): 263-70, 2011.
- [127] BONAVETTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F., “Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy”, Cement and Concrete Research, 33(6): 865–71, 2003.
- [128] PERA J, HUSSON S, GUILHOT B, “Influence of finely ground limestone on cement hydration”, Cement and Concrete Composites, 21(2): 99–105, 1999.
- [129] HEIKAL M, EL-DIDAMONY E, MORSY M. S, “Limestone-filled pozzolanic cement”, Cement and Concrete Research, 30(11): 1827–34, 2000.
- [130] ZHU W, GIBBS J C, “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 8, p.1457-1462, 2005.

- [131] VOGLIS N, KAKALI G, CHANIOTAKIS E, TSIVILIS S, « Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements », Cement and Concrete Composites, vol.27, n° 2, p.191-196, 2005.
- [132] BACHIORRINI A, CUSSINO L, “ Hydratation du ciment alumineux en présence d’agrégats calcaires”, 8th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, RIO DE JANEIRO, IV, p.383-388, 1986.
- [133] De LARRARD F, « Construire en béton, l’essentiel sur les matériaux », Presse de l’école nationale des Ponts et chaussées, ISBN 2-85978-366-0, Paris, 191 p, 2002.
- [134] HOOTON R D, “Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkalisilica reactivity”, ACI Materials Journal 1993; 90(2):143-51.
- [135] YAHIA A, TANIMURA M, SHIMOYAMA Y, “Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio” , Cement and Concrete Research, CCR journal 35 (3) (2005) 532-539
- [136] BERBAOUI R, « identification et analyse de l’endommagement par fatigue des matériaux granulaires a base polymère » thèse de doctorat de l’université du Maine Soutenue le 21 janvier 2010
- [137] CHAÏD R, JAUBERTHIE R, ZEGHICHE J, KHARCHI F, « Impact de la poudre de marbre conjuguée au calcaire du CEM II sur la durabilité du béton », European Journal of Environmental and Civil Engineering, Marsh 2011, vol 15/3, p. 427-445.

COMMUNICATIONS ET **PUBLICATIONS**

Ce travail a fait l'objet de publications et communications (orales - posters) suivantes :

I. Publications

1. **N.Haddadou, R.Chaid and Y.Ghernouti**, 2015. Experimental study on steel fiber reinforced self-compacting concrete incorporating high volume of marble powder. *European Journal of Environmental and Civil Engineerin* Volume 19, Issue 1, January 2015, pages 48-64
2. **N. Haddadou, R. Chaid, Y.Ghernouti & N. adjou**. The effect of hybrid steel fiber on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete. *J. Build. Mater. Struct.* (2014) 1: 64-75

II. Communications:

1. **N. HADDADOU, R.CHAID, M.BOUZOUALEGH, M.SOUICI**. Influence de la nature des sables sur la formulation et le comportement mécanique des bétons autoplaçants. Séminaire National sur les Matériaux locaux dans la construction, 26 & 27 Novembre 2012, Université Kasdi Merbah, Ouargla
2. **N. Haddadou, R. Chaid, L. Hakimi, M. Bouzoualegh, M. Souici**. Étude du comportement des bétons autoplaçants fibrés : Effet de la combinaison des fibres de tailles différentes. 1ier Congrès international de génie civil et d'hydraulique, Guelma, 10-11 décembre 2012
3. **N. Haddadou, R. Chaid, M. Bouzoualegh, M. Souici**. "Les bétons autoplaçants renforcés par un fibrage multi-échelle : de la formulation au comportement mécanique. CIMDD'2013 May 6th to 9th, 2013, Université M'Hamed Bougara Boumerdes
4. **N. Haddadou, R. Chaid, M. Bouzoualegh, M. Souici**. Les betons autoplaçants avec sable de dune : de la formulation au comportement mecanique. 6ème Symposium International sur la construction en zone sismique (SICZS'2013), Chlef les 9 et 10 Octobre 2013
5. **N. Haddadou, R. Chaid, M. Bouzoualegh, M. Souici**. Les bétons autoplaçants avec sable de dune : de la formulation au comportement mécanique. Congrès International Matériaux & Stabilité Structurelle. Rabat, Maroc, 27-30 Novembre 2013.

6. **N. HADDADOU, R. CHAID, A.MAZOUNI, N.ADJOU.** Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of marble powder, metakaolin and silica fume, International Civil Engineering Symposium for Academicians (ICESA'2014 – Side) Conference Venue: Side, Antalya, TURKEY Conference Date: May 17 – 20, 2014
7. **N.HADDADOU, R.CHAID, N.ADJOU & M.BOUZOUALEGH.** Experimental study of different type of fibers reinforced self-compacting concrete with different mineral addition. 3ème Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction, Alger, 17 et 18 Nov. 2014
8. **HADDADOU Naima, CHAID Rabah, ADJOU Naima & BOUZOUALEGH Malik.** The influence of fibers and mineral additives on self-compacting concrete. International Conference On Civil and Environmental Engineering, ICOCEE Cappadocia 2015 Turkey.
9. **HADDADOU Naima, CHAID Rabah, ADJOU Naima & BOUZOUALEGH Malik.** Experimental study on steel fiber reinforced self-compacting concrete with different aspect ratio and mineral addition. 5th Annual International Conference on Civil Engineering, Structural Engineering and Mechanics, 25-28 May 2015, Athens, Greece".