

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année : 2015

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES EFFETS DU LAITIER CRISTALLISÉ ET DES FIBRES DE DISS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS

Option

Matériaux innovants et durabilité

Par

Walid LAIFA

DEVANT LE JURY

Président	ACHOURA Djamel	Pr	Université d'Annaba
Rapporteur	BEHIM Mourad	Pr	Université d'Annaba
Examineur	ARABI Noureddine	Pr	Université d'Annaba
Examineur	BENMALEK Mohamed Larbi	Pr	Université de Guelma
Examineur	BENMARCE Abdelaziz	Pr	Université de Guelma
Examineur	OUCIEF Hocine	Pr	Université d'Annaba

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué au sein du Laboratoire Matériaux, Géomatériaux et Environnement (LMGE) du département de Génie Civil de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba et du Laboratoire Matériaux et Durabilité de Construction (LMDC) de l'Institut des Sciences appliquées (INSA) de Toulouse dans le cadre de l'accord programme Algéro – Français Tassili –Hubert CURIEN (code 12 MDU 874) soutenu financièrement par EGIDE. L'accord programme est dirigé par Pr. Mourad BEHIM pour la partie Algérienne et Dr. Michel MOURET pour la partie Française.

Je tiens tout d'abord à remercier profondément Pr. Mourad BEHIM, pour avoir accepté de diriger ce travail et qui m'a soutenu, encouragé et pour la confiance qu'il m'a accordée pendant toute la durée de la thèse.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance au Pr. Djamel ACHOURA, directeur du LMGE et Pr. Gilles ESCADEILLAS, directeur du LMDC.

Je voudrais également exprimer mes sincères remerciements aux Pr. Djamel ACHOURA pour avoir accepté de présider mon jury, Pr. Nouredine ARABI, Pr. Mohamed Larbi BENMALEK, Pr. Abdelaziz BENMARCE et Pr. Hocine OUCIEF pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont particulièrement au Pr. Anaclét TURATSINZE, pour avoir suivi l'évolution de mes travaux de recherche au sein du Laboratoire LMDC - Toulouse.

Je remercie aussi Dr. Michel MOURET, HDR à l'INSA de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire LMDC – Toulouse.

Je remercie très fort Dr. Tahar ALI BOUCETTA, pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier également mes amis : Amine, Adel, Mouloud, Hamza, Ali, Khairi, Kamel, Khaled et aussi mes collègues de la première et la deuxième promo pour leur fidélité et leur soutien.

Enfin, je remercie tout particulièrement mes chers parents, Alla mon frère, Lina ma sœur, qui étaient à mes côtés tout au long de ce travail. C'est grâce à leur amour, leur soutien et leur courage que j'en suis là aujourd'hui. Je leur dédie ce manuscrit en gage de ma reconnaissance.

RÉSUMÉ

AUTEUR : Walid LAIFA

TITRE : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES EFFETS DU LAITIER CRISTALLISÉ ET DES FIBRES DE DISS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS.

DIRECTEUR DE THÈSE : Pr. Mourad BEHIM, Professeur à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des matériaux extrêmement fluides dont la mise en place sans vibration présente plusieurs avantages tant au niveau environnemental, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industriels. Le BAP avec additions et le BAP de référence (sans additions) ont été coulés avec les mêmes constituants, un squelette granulaire identique et le même dosage en adjuvant. La seule différence entre les deux BAP est le volume de pâte. Nous avons utilisés plusieurs formulations pour étudier l'effet du laitier cristallisé comme matériaux d'étude, sur les propriétés des bétons autoplaçants et le filler calcaire comme matériau témoin. La première partie de cette étude montre que toutes les additions ont un effet favorable sur les caractéristiques rhéologiques et physico-mécaniques.

Le renforcement du béton par les fibres métalliques ou synthétiques est une démarche classique. Cependant pour le béton autoplaçant (BAP), l'utilisation de fibres peut affecter la capacité d'écoulement du matériau en particulier lorsqu'il s'agit de fibres végétales. En effet, les fibres végétales se caractérisent par un pouvoir d'absorption d'eau important et leur contour n'est pas lisse comme celui des fibres de polypropylène, il présente des aspérités et une rugosité. Cet état de surface a des effets contradictoires : il entraîne une légère diminution de la fluidité du béton d'une part et améliore l'adhérence des fibres à la matrice cimentaire d'autre part. Dans cette étude, deux types de fibres ont été utilisés : une fibre de polypropylène comme témoin et la fibre de diss comme matériau d'étude. La deuxième partie de notre travail a consisté à mettre en évidence les effets de ces fibres sur le comportement des BAP à l'état frais et durci. Les résultats obtenus montrent que le taux optimal des fibres est de 0,06%.

Mots clés : Béton autoplaçant (BAP), additions, fibres végétales, durabilité.

ABSTRACT

AUTHOR : Walid LAIFA

TITLE : CONTRIBUTION TO THE STUDY OF EFFECTS OF CRYSTALLIZED SLAG AND DISS FIBER ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE.

DIRECTOR OF THESIS : Pr. Mourad BEHIM, Professor at the University Badji Mokhtar - Annaba, Algeria.

Self-compacting concrete (SCC) are the extremely fluid materials of which the setting up without vibration presents several advantages to the environmental, technological level and economic that interests the industrial.

The SCC with additions and the SCC without additions have been flowed with an identical granular skeleton and the same admixture. The only difference between the two SCC is the paste volume. We used several formulations so that they help us studied the effect of the crystallized slag and the limestone filler (witness addition) on the properties of the Self-compacting concrete. The first part of this study shows that all additions have a favorable effect on the rheological and mechanical characteristics.

Concrete reinforcement by steel fibers or synthetic fibers is usual. However, for self compacting concrete (SSC) the fiber-reinforcement can decrease the workability. This is particularly true for vegetable fibers due to the roughness of their surface. Such a surface state has contradictory effects on the material properties: on one hand, it reduces the flow of fresh concrete and on the other hand, it improves the bond between the fibers and the hardened cement matrix. In this thesis, two types of fibers were used: polypropylene fibers and natural fibers (Diss fibers). The second part of our work was to demonstrate the effects of these fibers on the SCC in the fresh and hardened state. The results obtained show that the optimal rate of the fibers is 0.06%.

Keywords: Self compacting concrete (SCC), additions, vegetable fibers, durability.

ملخص

AUTEUR : Walid LAIFA

TITRE : CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES EFFETS DU LAITIER CRISTALLISÉ ET DES FIBRES DE DISS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS.

DIRECTEUR DE THÈSE : Pr. Mourad BEHIM, Professeur à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.

الخرسانة ذاتية القوية تتميز بسبولة عالية و لديها العديد من المزايا مثل الفائدة البيئية، التكنولوجية والاقتصادية.

الخرسانة ذاتية القوية مع الإضافات والخرسانة ذاتية القوية (بدون إضافات) لهم نفس الهيكل الحبيبي و نفس المكونات. الفرق الوحيد بين الاثنين هو حجم العجين. استخدمنا عدة تركيبات لدراسة تأثير النفايات الصناعية على خواص الخرسانة مثل الخبث المحبب و الحجر الجيري. الجزء الأول من هذه الدراسة تبين أن جميع الإضافات لها تأثير إيجابي على الخصائص الريولوجية ، الفيزيائية والميكانيكية.

تسليح الخرسانة بواسطة ألياف معدنية أو تركيبية أمر طبيعي. ولكن الألياف قد تقلل من الطاقة المتدفقة للخرسانة ذاتية القوية خاصة عند استعمال الألياف النباتية. في الواقع تتميز الألياف النباتية بقدرة كبيرة على امتصاص الماء ، و ألياف الديس ليست ملساء مثل ألياف مادة البولي بروبيلين، ولكنها تحتوي على اشواك خشنة. هذا السطح له تأثيرات متناقضة، يقلل من تدفق الخرسانة الطازجة من ناحية لكنه يزيد من الالتصاق بين الألياف ومصفوفة الأسمنت من جهة أخرى. مهمتنا هي تسليط الضوء على هذه الآثار وتحسين كميات ألياف الديس مقارنة بألياف البولي بروبيلين و ذلك بدراسة الخرسانة ذاتية القوية في الحالة المائعة والحالة الصلبة. تظهر النتائج في الواقع ان المعدل الأمثل للألياف هو 0.06%.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة ذاتية القوية- الإضافات- الألياف النباتية - المستدامة.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	v
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	02

CHAPITRE I ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BAP

1. INTRODUCTION	07
2. NOTIONS SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS	08
2.1. Définition.....	08
2.2. Comparaison entre un béton ordinaire et un BAP.....	09
2.3. Paramètres influençant la formulation d'un BAP.....	10
2.3.1. Un volume de pâte élevé.....	10
2.3.2. Une quantité de fines (< 80 µm) importante.....	10
2.3.3. L'emploi de superplastifiant.....	10
2.3.4. Utilisation d'un agent de viscosité.....	11
2.3.5. Un faible volume de gravillon.....	11
3. ADDITIONS MINÉRALES UTILISÉES DANS LES BAP	11
3.1. Fillers calcaires.....	11
3.2. Laitier de haut fourneau.....	12
3.3. Fumée de silice.....	12
3.4. Cendre volante.....	13
4. EFFETS PHYSICO-CHIMIQUES DES ADDITIONS	13
4.1. Effet filler ou effet de remplissage.....	13
4.2. Effet chimique ou pouzzolanique.....	13
4.3. Effet physique ou de surface.....	15
5. MÉTHODES DE FORMULATION DES BAP	14

5.1. Pratique actuelle de la formulation des BAP.....	14
5.2. Quelques approches de formulation des BAP.....	14
5.2.1. Méthode Basée sur l'optimisation des Mortiers.....	14
5.2.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	15
5.2.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	15
5.3. Exemples de compositions des BAP.....	16
6. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	16
6.1. Mobilité en milieu non confiné.....	16
6.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow).....	16
6.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel).....	17
6.2. Mobilité en milieu confiné.....	17
6.2.1. Essai a la boîte en U (U-BOX TEST).....	18
6.2.2. Essai d'étalement modifié (J-ring).....	18
6.2.3. Essai a la boîte en L.....	19
6.2.4. Essai de la passoire.....	19
6.3. Stabilité.....	20
6.3.1. Essai de stabilité au tamis.....	20
6.4. Limite d'acceptation des essais.....	20
7. CORRÉLATION ENTRE LES ESSAIS EMPIRIQUES ET LES MESURES RHÉOLOGIQUES	21
7.1. Essai à la boîte LCPC (LCPC Box).....	22
8. CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES BAP	23
9. PROPRIÉTÉS DES BAP À L'ÉTAT DURCI	25
9.1. Performances mécaniques des BAP.....	25
9.1.1. Résistance mécanique.....	25
9.2. Retrait.....	26
9.3. Propriétés physico-chimiques et durabilité.....	26
9.3.1. Absorption capillaire.....	27
9.3.2. Carbonatation.....	27
10. LES FIBRES	28
10.1. Différents types de fibres.....	28
10.2. Propriétés générales des fibres.....	29
10.3. Les fibres végétales.....	29
10.3.1. Classification des fibres végétales.....	30
10.3.1.1. Les fibres de feuilles.....	30
10.3.1.2. Les fibres de tiges.....	30
10.3.1.3. Les fibres de bois.....	31
10.3.1.4. Les fibres de surface.....	31
10.3.2. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	31
10.3.3. Caractéristiques chimiques des fibres végétales.....	32
10.3.3.1. Cellulose.....	32
10.3.3.2. Hémicellulose.....	32
10.3.3.3. Lignine.....	32
10.3.4. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	32

10.4. Rôle des fibres.....	33
10.5. Principe d'action des fibres.....	34
10.6. Processus de couture des fissures.....	35
10.7. Utilisation de deux ou plusieurs types de fibres.....	35
10.8. Utilisation des fibres dans la construction.....	36
10.9. Orientation préférentielle des fibres.....	36
11. BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS	37
11.1. Influence des fibres sur les propriétés des BAP à l'état frais.....	38
11.2. Orientation et distribution des fibres.....	39
11.3. Comportement mécanique des BAP fibrés.....	40
11.3.1. Comportement à la compression et à la traction.....	40
11.3.2. Comportement à la flexion.....	40
12. CONCLUSION	41

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

1. INTRODUCTION	46
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	46
2.1. Ciment.....	46
2.2. Granulats.....	48
2.3. Additions minérales.....	49
2.3.1. Filler calcaire.....	49
2.3.2. Laitier cristallisé.....	50
2.4. Adjuvant.....	52
2.5. Eau.....	52
2.6. Fibres.....	52
2.6.1. Fibres de polypropylène.....	52
2.6.2. Fibres de diss.....	53
2.6.2.1. Constituants hydrosolubles et organiques des fibres de diss.....	54
2.6.2.2. Traitement des fibres de diss.....	54
2.6.2.3. Microstructure et caractéristiques physico-mécaniques des fibres de diss.....	54
3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	56
3.1. Caractérisation microstructurale.....	56
3.3.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX).....	56
3.2. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	57
3.2.1. Mobilité en milieu non confiné.....	57
3.2.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	57
3.2.1.2. Temps d'étalement T_{500}	58
3.2.1.3. Essai à la boîte LCPC.....	58
3.2.2. Mobilité en milieu confiné.....	59

3.2.2.1. Essai à la boîte en L.....	59
3.2.3. Stabilité.....	60
3.2.3.1. Essai de stabilité au tamis.....	60
3.2.4. Mesure de l'air occlus.....	61
3.3. Caractérisation des BAP à l'état durci.....	62
3.3.1. Confection et conservation des éprouvettes.....	62
3.3.2. Essais mécaniques.....	62
3.3.2.1. Essai de compression et de traction par flexion.....	62
3.3.2.2. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures.....	63
3.3.3. Vérification de l'absence de ségrégation.....	65
3.3.4. Essai de retrait empêché.....	65
3.3.5. Essais physico-chimiques.....	67
3.3.5.1. Absorption d'eau par capillarité.....	67
3.3.5.2. Essai de carbonatation accélérée.....	68
3.3.5.3. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	70
4. CONCLUSION	71

CHAPITRE III FORMULATIONS DES BÉTONS

1. INTRODUCTION	75
2. MÉTHODE DE FORMULATION DES BAP	75
2.1. Composition théorique des BAP.....	76
2.2. Ajustement des dosages pour satisfaire les propriétés rhéologiques des BAP....	78
2.3. Composition du BAP de référence et BAP d'étude	78
3. COMPOSITION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS	80
4. CONCLUSION	81

CHAPITRE IV EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

1. INTRODUCTION	85
2. OUVRABILITÉ DES BAP	85
3. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS	86
3.1. Etalement au cône d'Abrams.....	86
3.2. Temps T ₅₀₀	87
3.3. Écoulement à la boîte LCPC.....	88
3.4. Taux de remplissage dans la boîte en L.....	89

3.5. Stabilité au tamis.....	90
3.6. Propriétés rhéologiques.....	91
3.6.1. Seuil de cisaillement.....	91
3.6.2. Viscosité plastique.....	92
4. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT DURCI	93
4.1. Caractérisation mécanique des BAP.....	93
4.1.1. Résistance en compression.....	93
4.1.2. Cinétique de durcissement des BAP avec additions.....	97
4.1.2.1. Cas des BAP avec FC.....	97
4.1.2.2. Cas des BAP avec LC.....	97
4.1.3. Étude comparative entre la résistance de FC et de LC.....	98
4.1.3.1. Pour un dosage de 30 %.....	98
4.1.3.2. Pour un dosage de 45 %.....	98
4.1.3.3. Pour un dosage de 60 %.....	99
4.1.4. Résistance en traction par flexion.....	100
4.1.5. Vérification de l'absence de ségrégation.....	100
4.1.5.1. Béton de référence.....	100
4.1.5.2. Béton avec addition de filler calcaire.....	101
4.1.5.3. Béton avec addition de laitier cristallisé.....	101
5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	102
5.1. Absorption capillaire.....	103
5.1.1. Perte de masse.....	103
5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire.....	103
5.2. Porosité accessible à l'eau.....	104
5.3. Carbonatation accélérée.....	105
5.3.1. Suivi de masse.....	105
5.3.2. Profondeur carbonatée.....	106
6. CONCLUSION	107

CHAPITRE V

EFFET DES FIBRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

1. INTRODUCTION	111
2. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS	111
2.1. Etalement au cône d'Abrams.....	111
2.2. Temps T_{500}	112
2.3. Écoulement à la boîte LCPC.....	113
2.4. Taux de remplissage dans la boîte en L.....	114
2.5. Stabilité au tamis.....	115
2.6. Air occlus.....	116
2.7. Propriétés rhéologiques.....	117
2.7.1. Seuil de cisaillement.....	117
2.7.2. Viscosité plastique.....	119

3. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT DURCI	121
3.1. Caractérisation mécanique des BAP fibrés.....	121
3.1.1. Résistance en compression.....	121
3.1.2. Étude comparative sur la résistance en compression des BAP fibrés.....	123
3.1.3. Résistance en traction par flexion.....	125
3.1.4. Étude comparative sur la résistance en traction par flexion des BAP fibrés.....	126
3.1.5. Exploitation des résultats obtenus (ouvrabilité et résistance mécanique).....	128
3.1.6. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures.....	129
4. RETRAIT EMPÊCHÉ	132
5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	134
5.1. Absorption capillaire.....	134
5.1.1. Perte de masse.....	134
5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire.....	135
5.2. Porosité accessible à l'eau.....	137
5.3. Carbonatation accélérée.....	138
5.3.1. Suivi de masse.....	138
5.3.2. Profondeur carbonatée.....	139
6. CONCLUSION	140
CONCLUSION GÉNÉRALE	144
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	149
Annexe A : Effet des fibres de diss sur les caractéristiques mécaniques du mortier.....	158
Annexe B : Fiches techniques.....	163

Liste des figures

Figure 1.1. Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP (Okamura et al, 00).....	09
Figure 1.2. Phénomène de blocage d'un granulat au droit d'un obstacle.....	09
Figure 1.3. Répulsion électrostatique entre les particules de ciment (Diederich, 10)..	11
Figure 1.4. Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	15
Figure 1.5. Essai au cône d'Abrams.....	17
Figure 1.6. Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel).....	17
Figure 1.7. Schématisation de l'essai du tube en U.....	18
Figure 1.8. Essai d'étalement modifié (J-ring).....	19
Figure 1.9. Schématisation de la boîte en L.....	19
Figure 1.10. Essai de la passoire.....	20
Figure 1.11. Schématisation de l'essai de stabilité au tamis.....	20
Figure 1.12. Corrélations viscosité- T_{500}	21
Figure 1.13. Dispositif de la boîte LCPC.....	22
Figure 1.14. Relation entre longueur d'étalement et seuil découlement.....	23
Figure 1.15. Exemple de comportement rhéologique pour différents types de béton (Assié, 04).....	24
Figure 1.16. Etalement au cône d'Abrams en fonction du temps de repos (Toutou <i>et al</i> , 05).....	25
Figure 1.17. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (Gibbs <i>et al</i> , 99).....	25
Figure 1.18. Retraits des BAP _{B1} (E/C=0,50), BAP _J (E/C=0,43) et BO ₀ (E/C=0,45)...	26
Figure 1.19. Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF), (Zhu <i>et al</i> , 01).....	27
Figure 1.20. Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C (Sakata, 98).....	28
Figure 1.21. Exemples des fibres d'acier, de carbone et de polypropylène.....	29
Figure 1.22. Exemples des fibres végétales	30
Figure 1.23. Présentation de l'apport du renfort par des fibres (Cotterell <i>et al</i> , 96)...	34
Figure 1.24. Processus de fissuration du béton.....	34
Figure 1.25. Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures (Kawamata <i>et al</i> , 03).....	36
Figure 1.26. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion (Casanova, 96).....	37

Figure 1.27. Effets des fibres sur l'étalement des BAP (Grunewald <i>et al</i> , 01).....	38
Figure 1.28. L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre (Grunewald <i>et al</i> , 01).....	39
Figure 1.29. Courbe force-flèche pour différentes compositions (Alcantara, 04).....	41
Figure 2.1. Courbe granulométrique du ciment.....	47
Figure 2.2. Courbes granulométriques des granulats.....	48
Figure 2.3. Filler calcaire.....	49
Figure 2.4. DRX du filler calcaire (LMDC – Toulouse).....	50
Figure 2.5. Laitier cristallisé.....	50
Figure 2.6. Courbes granulométriques des additions.....	51
Figure 2.7. DRX du laitier cristallisé (LMDC – Toulouse).....	52
Figure 2.8. Fibres de polypropylène.....	53
Figure 2.9. Plante de diss (El Kala, Algérie).....	53
Figure 2.10. Tige de diss.....	53
Figure 2.11. Fibre de diss après concassage et découpage.....	55
Figure 2.12. Mise en évidence des épines des fibres de diss (LMDC – Toulouse).....	55
Figure 2.13. Essai de traction directe sur la tige de diss (Laboratoire de Génie Civil - Annaba).....	55
Figure 2.14. Courbe contrainte - déformation de la fibre de diss.....	56
Figure 2.15. Etalement d'un BAP homogène et fluide.....	58
Figure 2.16. Etalement d'un BAP sans ressuage.....	58
Figure 2.17. Essai à la boîte LCPC.....	59
Figure 2.18. Relation entre longueur d'étalement et seuil découlement.....	59
Figure 2.19. Essai à la boîte en L.....	60
Figure 2.20. Essai de stabilité au tamis.....	61
Figure 2.21. Aéromètre à béton.....	61
Figure 2.22. Position de l'entaille sciée dans l'éprouvette	63
Figure 2.23. Configuration type pour le mesurage de CMOD.....	64
Figure 2.24. Mesure de l'ouverture des fissures.....	64
Figure 2.25. Exemple d'une ségrégation statique dans un volume de béton (Bensebti, 08).....	65
Figure 2.26. Essai de retrait empêché : (géométrie de l'éprouvette) A= 13mm, B= 330mm, C= 406mm et H= 150mm (ASTM C, 05).....	66
Figure 2.27. Connexion des jauges aux appareils de mesure de déformation.....	66
Figure 2.28. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité....	67
Figure 2.29. Photographie de l'essai d'absorption capillaire.....	68

Figure 2.30. Enceinte de carbonatation.....	68
Figure 2.31. (a) : BAP dégradés par la carbonatation après 28 jours d'exposition, (b) : Le principe de mesure de l'épaisseur carbonatée.....	69
Figure 2.32. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	70
Figure 3.1. Optimisation du volume des granulats.....	77
Figure 3.2. Etallement d'un BAP (Formulation N° 7).....	78
Figure 4.1. Influence des additions sur l'étalement des BAP.....	86
Figure 4.2. Influence des additions sur le T_{500} des BAP.....	87
Figure 4.3. Influence des additions sur la longueur d'écoulement des BAP.....	88
Figure 4.4. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams.....	89
Figure 4.5. Influence des additions sur le taux de remplissage des BAP.....	90
Figure 4.6. Influence des additions sur la stabilité au tamis des BAP.....	91
Figure 4.7. Influence des additions sur le seuil de cisaillement des BAP.....	91
Figure 4.8. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC...	92
Figure 4.9. Influence des additions sur la viscosité plastique des BAP.....	92
Figure 4.10. Relation entre la viscosité plastique et le temps T_{500}	93
Figure 4.11. Influence des additions sur la résistance en compression à 2 jours de durcissement.....	94
Figure 4.12 Influence des additions sur la résistance en compression à 7 jours de durcissement.....	94
Figure 4.13. Influence des additions sur la résistance en compression à 28 jours de durcissement.....	95
Figure 4.14. Influence des additions sur la résistance en compression à 90 jours de durcissement.....	96
Figure 4.15. Cinétique de durcissement des BAP avec addition de filler calcaire.....	97
Figure 4.16. Cinétique de durcissement des BAP avec addition de laitier cristallisé...	98
Figure 4.17. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 30 %.....	98
Figure 4.18. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 45 %.....	99
Figure 4.19. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 60 %.....	99
Figure 4.20. Influence des additions sur la résistance en traction par flexion à 28 jours de durcissement.....	100
Figure 4.21. Observation de la répartition des granulats du BAPR.....	101
Figure 4.22. Observation de la répartition des granulats des BAPFC (30, 45 et 60%), présentés de gauche à droite.....	101

Figure 4.23. Observation de la répartition des granulats des BAPLC (30, 45 et 60%) présentés de gauche à droite.....	102
Figure 4.24. Perte de masse des échantillons due à leur séchage.....	103
Figure 4.25. Coefficient d'absorption d'eau des échantillons.....	104
Figure 4.26. Porosité ouverte des BAP.....	105
Figure 4.27. Variation de la masse des BAP due à la carbonatation.....	106
Figure 4.28. Profondeur dégradée des BAP due à la carbonatation.....	106
Figure 5.1. Influence des fibres sur l'étalement des BAP.....	112
Figure 5.2. Influence des fibres sur le T_{500} des BAP.....	112
Figure 5.3. Influence des fibres sur la longueur d'écoulement des BAP.....	113
Figure 5.4. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams pour les BAP avec fibres de PP.....	114
Figure 5.5. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams pour les BAP avec fibres de diss.....	114
Figure 5.6. Influence des fibres sur le taux de remplissage des BAP.....	115
Figure 5.7. Influence des fibres sur la stabilité au tamis des BAP.....	116
Figure 5.8. Influence des fibres sur la teneur en air des BAP.....	117
Figure 5.9. Influence des fibres sur le seuil de cisaillement des BAP.....	118
Figure 5.10. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC pour les BAP avec fibres de PP.....	118
Figure 5.11. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC pour les BAP avec fibres de diss.....	119
Figure 5.12. Influence des fibres sur la viscosité plastique des BAP.....	119
Figure 5.13. Relation entre la viscosité plastique et le temps T_{500} pour les BAP avec fibres de PP.....	120
Figure 5.14. Relation entre la viscosité plastique et le temps T_{500} pour les BAP avec fibres de diss.....	120
Figure 5.15. Influence des fibres sur la résistance en compression à 2 jours de durcissement.....	121
Figure 5.16 Influence des fibres sur la résistance en compression à 7 jours de durcissement.....	122
Figure 5.17. Influence des fibres sur la résistance en compression à 28 jours de durcissement.....	122
Figure 5.18. Interface fibre de diss – matrice cimentaire après l'écrasement de l'éprouvette (INSA-Toulouse).....	123
Figure 5.19. Influence des fibres sur la résistance en compression à 90 jours de durcissement.....	123
Figure 5.20. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,03 % de fibres.....	124

Figure 5.21. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,06 % de fibres.....	124
Figure 5.22. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,1 % de fibres.....	124
Figure 5.23. Influence des fibres sur la résistance en traction par flexion à 2 jours de durcissement.....	125
Figure 5.24. Influence des fibres sur la résistance en traction par flexion à 28 jours de durcissement.....	126
Figure 5.25. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,03%.....	127
Figure 5.26. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,06%.....	127
Figure 5.27. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,1%.....	128
Figure 5.28. Courbes forces – ouverture d’entaille des BAPFC fibrés.....	129
Figure 5.29. Courbes forces – ouverture d’entaille des BAPLC fibrés.....	130
Figure 5.30. Courbes forces – flèche des BAPFC fibrés.....	130
Figure 5.31. Courbes forces – flèche des BAPLC fibrés	131
Figure 5.32. Evolution de la capacité portante des BAPFC en fonction de la nature des fibres.....	131
Figure 5.33. Evolution de la capacité portante des BAPLC en fonction de la nature des fibres.....	132
Figure 5.34. Evolution dans le temps de la déformation de l’anneau métallique sous l’étreinte due aux variations dimensionnelles des BAPFC fibrés.....	133
Figure 5.35. Evolution dans le temps de la déformation de l’anneau métallique sous l’étreinte due aux variations dimensionnelles des BAPLC fibrés.....	133
Figure 5.36. Fissuration de l’éprouvette annulaire.....	134
Figure 5.37. Perte de masse des BAPFC fibrés due à leur séchage.....	134
Figure 5.38. Perte de masse des BAPLC fibrés due à leur séchage.....	135
Figure 5.39. Coefficient d’absorption d’eau des BAPFC fibrés.....	136
Figure 5.40. Coefficient d’absorption d’eau des BAPLC fibrés.....	136
Figure 5.41. Interface fibre de diss – matrice cimentaire (INSA-Toulouse).....	137
Figure 5.42. Porosité ouverte des BAP fibrés.....	137
Figure 5.43. Variation de la masse des BAPFC fibrés due à la carbonatation.....	138
Figure 5.44. Variation de la masse des BAPLC fibrés due à la carbonatation.....	139
Figure 5.45. Profondeur dégradée des BAPFC fibrés due à la carbonatation.....	139
Figure 5.46. Profondeur dégradée des BAPLC fibrés due à la carbonatation.....	140

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Exemples de différentes compositions utilisées en France.....	16
Tableau 1.2. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres.....	29
Tableau 1.3. Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées....	31
Tableau 1.4. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	31
Tableau 1.5. Composition chimique de quelques fibres végétales.....	32
Tableau 1.6. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	33
Tableau 1.7. Renforcements de fibres dans les produits cimentaires.....	36
Tableau 2.1. Compositions chimiques du ciment.....	47
Tableau 2.2. Compositions minéralogiques du clinker.....	47
Tableau 2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment employé.....	47
Tableau 2.4. Caractéristique des granulats.....	48
Tableau 2.5. Caractéristiques chimiques des fillers calcaires.....	49
Tableau 2.6. Caractéristiques physiques des fillers calcaires.....	49
Tableau 2.7. Caractéristiques chimiques du laitier cristallisé.....	50
Tableau 2.8. Caractéristiques physiques du laitier cristallisé.....	51
Tableau 2.9. Caractéristiques des fibres de polypropylène selon le fabricant (Annexe B).....	53
Tableau 2.10. Pourcentages des matières hydrosolubles et organiques des fibres de diss.....	54
Tableau 2.11. Essais de prise sur différents mélanges.....	54
Tableau 2.12. Caractéristiques des fibres de diss.....	56
Tableau 2.13. Valeurs recommandées par les normes (EN 206 – 9, 10).....	57
Tableau 2.14. Calcul de la profondeur de carbonatation (exemple).....	69
Tableau 3.1. Formulations des BAP.....	78
Tableau 3.2. Composition du BAP de référence (sans addition).....	79
Tableau 3.3. Composition des BAP d'étude.....	79
Tableau 3.4. Dosages massiques des fibres.....	80
Tableau 3.5. Compositions des BAP avec fibre de polypropylène et diss.....	81
Tableau 4.1. Résultats des essais optimisés à l'état frais.....	102
Tableau 5.1. Paramètres optimaux à l'état frais et durci.....	128

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les bétons autoplaçants (BAP) se caractérisent par une grande fluidité et se mettent en place sans vibration. Cette propriété peut être obtenue par l'emploi de superplastifiant et l'augmentation du volume de pâte (AFGC, 08). Pour garantir un volume de pâte suffisant, l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous produits ou des déchets, est nécessaire. De nombreuses études ont montrées les effets favorables des additions minérales fines sur les propriétés des BAP à l'état frais et à l'état durci (El Barak, 05), notamment les fillers calcaires (FC) qui sont les plus utilisées. Cependant peu d'études ont été menées sur le laitier cristallisé (LC), qui est peu valorisé, très souvent utilisé comme remblai. Son emploi dans les BAP pourrait constituer une alternative intéressante aussi bien sur le plan environnemental que sur le plan technico-économique.

Le fibrage des bétons permet de leur conférer une meilleure résistance à la propagation de la fissuration et d'augmenter leurs résistances mécaniques dans certaines conditions (Toledo *et al*, 05).

L'emploi des fibres végétales dans les matériaux du génie civil est récent (Savastano *et al*, 99). Leur introduction dans le béton est restée timide voire inexistante malgré les multiples avantages économiques, écologiques et techniques qu'elles présentent. Parmi les fibres végétales les plus étudiées et utilisées, on peut citer le chanvre, la paille, le sisal et le bambou, mais très peu d'études ont été consacrées à la fibre de DISS (Merzoud *et al*, 08).

Le DISS est une graminée répandue à l'état sauvage dans les montagnes principalement (Est d'Algérie), appelée localement le DISS mais son nom scientifique est l'*Ampélodesmos mauritanicus*. Cette plante était utilisée dans la réalisation d'habitats ruraux anciens en terre armée de DISS, pour son abondance mais aussi en raison de ses qualités mécaniques, car elle présente une résistance en traction de l'ordre de 100 MPa. Le contour de la fibre de DISS n'est pas lisse comme celui de la fibre de polypropylène, mais constitué d'aspérités et de rugosité. Cet état de surface peut avoir des effets contradictoires sur le BAP, diminue l'écoulement du béton frais, compromettre ainsi la principale propriété des BAP et pourrait améliorer la résistance en traction.

Le DISS présente une absorption d'eau très importante et largue des substances ayant pour effet de retarder la prise et le durcissement du ciment (Merzoud *et al*, 08). Le but de cette étude est de mettre en évidence l'influence de la fibre de DISS sur les caractéristiques des BAP à l'état frais (étalement, taux de remplissage et stabilité au tamis) et à l'état durci (résistance mécanique, retrait et durabilité).

Dans cette étude, la fibre de polypropylène est utilisée comme fibre témoin. Pour mener à bien cette contribution visant à formuler un BAP avec substitution du filler

calcaire par le laitier cristallisé dans une première phase et incorporer la fibre de Diss en remplacement de la fibre de polypropylène dans le BAP dans la seconde phase.

Nous avons structuré notre travail en cinq chapitres :

Le premier chapitre bibliographique est composé de deux parties principales. La première est consacrée à l'état des connaissances actuelles sur le sujet notamment les BAP. Les différentes méthodes de formulation ainsi que le rôle des constituants permettant d'obtenir un béton très fluide et homogène. Dans la deuxième partie sont exposés les différents types de fibres utilisées dans le domaine du génie civil et leurs effets sur le comportement des BAP à l'état frais et durci.

Le deuxième chapitre traite des méthodes expérimentales et la caractérisation des matières premières utilisées dans ce travail et en particulier les additions (le filler calcaire, le laitier cristallisé) qui ont fait l'objet d'analyses chimiques, physiques et microstructurales. Les fibres végétales, l'autre constituant des BAP fibrés, ont été caractérisées à l'état brut et après traitement hydrothermal. Les essais normalisés de caractérisation des BAP et autres tests spécifiques et accélérés de durabilité sont également exposés dans ce chapitre de façon explicite et détaillée.

Le troisième chapitre est structuré en deux parties, la première partie est consacrée à l'approche de formulation des BAP d'étude en se basant sur les compositions de BAP de référence dont la formulation utilisée est appuyée sur une méthode empirique recommandée par l'AFGC et une méthode classique de Dreux Gorisse pour fixer le dosage des granulats. L'optimisation des compositions du BAP est réalisée grâce à des essais d'étalement, en modifiant à chaque fois les dosages de l'adjuvant et de l'eau. Pour cela, plusieurs rapports E/C ont été étudiés. Tandis que la deuxième partie est consacrée à la caractérisation à l'état frais d'un BAP renforcé par des fibres de polypropylène (témoin) et des fibres de diss (d'étude) avec optimisation des dosages.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de l'effet de l'introduction du laitier cristallisé dans les BAP en substituant le filler calcaire. Pour cela, trois dosages d'addition ont été utilisés (30%, 45% et 60% par rapport au poids du ciment) correspondant au volume de pâte recommandé par l'AFGC pour communiquer au béton le caractère autoplaçant. Ainsi, la caractérisation des BAP a été réalisée grâce à des essais rhéologiques, mécaniques et de tests de durabilité accélérée.

Dans le dernier chapitre, les propriétés à l'état frais et à l'état durci des BAP renforcés de fibres ont été étudiées. Il s'agit surtout de l'étalement au cône d'Abrams, le pouvoir de remplissage à la boîte en L, la stabilité au tamis, la résistance en compression, en traction par flexion, la capacité de déformation, les variations dimensionnelles et la durabilité accélérée (absorption capillaire, porosité ouverte et carbonatation).

Enfin, la conclusion générale présente une synthèse des résultats obtenus dans cette étude.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES

BAP

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BAP

Sommaire

1. INTRODUCTION	07
2. NOTIONS SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS	08
2.1. Définition.....	08
2.2. Comparaison entre un béton ordinaire et un BAP.....	09
2.3. Paramètres influençant la formulation d'un BAP.....	10
2.3.1. Un volume de pâte élevé.....	10
2.3.2. Une quantité de fines (< 80 µm) importante.....	10
2.3.3. L'emploi de superplastifiant.....	10
2.3.4. Utilisation d'un agent de viscosité.....	11
2.3.5. Un faible volume de gravillon.....	11
3. ADDITIONS MINERALES UTILISEES DANS LES BAP	11
3.1. Fillers calcaires.....	11
3.2. Laitier de haut fourneau.....	12
3.3. Fumée de silice.....	12
3.4. Cendre volante.....	13
4. EFFETS PHYSICO-CHIMIQUES DES ADDITIONS	13
4.1. Effet filler ou effet de remplissage.....	13
4.2. Effet chimique ou pouzzolanique.....	13
4.3. Effet physique ou de surface.....	14
5. METHODES DE FORMULATION DES BAP	14
5.1. Pratique actuelle de la formulation des BAP.....	14
5.2. Quelques approches de formulation des BAP.....	14
5.2.1. Méthode Basée sur l'optimisation des Mortiers.....	14
5.2.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	15
5.2.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires.....	15
5.3. Exemples de compositions des BAP.....	16
6. CARACTERISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS	16
6.1. Mobilité en milieu non confiné.....	16
6.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow).....	16
6.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel).....	17
6.2. Mobilité en milieu confiné.....	17
6.2.1. Essai a la boîte en U (U-BOX TEST).....	18
6.2.2. Essai d'étalement modifié (J-ring).....	18
6.2.3. Essai a la boîte en L.....	19
6.2.4. Essai de la passoire.....	19

6.3. Stabilité.....	20
6.3.1. Essai de stabilité au tamis.....	20
6.4. Limite d'acceptation des essais.....	20
7. CORRÉLATION ENTRE LES ESSAIS EMPIRIQUES ET LES MESURES RHÉOLOGIQUES	21
7.1. Essai à la boîte LCPC (LCPC Box).....	22
8. CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES BAP	23
9. PROPRIÉTÉS DES BAP À L'ÉTAT DURCI	25
9.1. Performances mécaniques des BAP.....	25
9.1.1. Résistance mécanique.....	25
9.2. Retrait.....	26
9.3. Propriétés physico-chimiques et durabilité.....	26
9.3.1. Absorption capillaire.....	27
9.3.2. Carbonatation.....	27
10. LES FIBRES	28
10.1. Différents types de fibres.....	28
10.2. Propriétés générales des fibres.....	29
10.3. Les fibres végétales.....	29
10.3.1. Classification des fibres végétales.....	30
10.3.2. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales.....	31
10.3.3. Caractéristiques chimiques des fibres végétales.....	32
10.3.3.1. Cellulose.....	32
10.3.3.2. Hémicellulose.....	32
10.3.3.3. Lignine.....	32
10.3.4. Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	32
10.4. Rôle des fibres.....	33
10.5. Principe d'action des fibres.....	34
10.6. Processus de couture des fissures.....	35
10.7. Utilisation de deux ou plusieurs types de fibres.....	35
10.8. Utilisation des fibres dans la construction.....	36
10.9. Orientation préférentielle des fibres.....	36
11. BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS	37
11.1. Influence des fibres sur les propriétés des BAP à l'état frais.....	38
11.2. Orientation et distribution des fibres.....	39
11.3. Comportement mécanique des BAP fibrés.....	40
11.3.1. Comportement à la compression et à la traction.....	40
11.3.2. Comportement à la flexion.....	40
12. CONCLUSION	41

Chapitre I

Étude bibliographique sur les BAP

1. INTRODUCTION

La vibration du béton a pour but de faciliter son écoulement et par conséquent le remplissage correct des coffrages, chasser l'air emprisonné et communiquer au béton une plus grande compacité et par conséquent une meilleure résistance mécanique et une durabilité accrue.

La difficulté croissante de mettre en place un béton ordinaire pour des structures de configuration complexe et une plus grande densité de ferrailage ont conduit des chercheurs Japonais au milieu des années 1980 à développer un nouveau béton, communément appelé béton autoplaçant (BAP).

En effet, contrairement au béton ordinaire (BO), les BAP sont extrêmement fluides et leur mise en œuvre ne nécessite pas une vibration. Cette propriété facilite le coulage des BAP dans des coffrages très ferrillés ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles (Boukni, 07).

L'absence de la vibration présente quelques avantages :

- stabilité des coffrages,
- diminution de la pénibilité du travail
- confort acoustique pour les ouvriers et au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Plusieurs œuvres ont été réalisées avec le BAP surtout au Japon où l'utilisation de ce nouveau matériau est devenue très populaire dans le domaine de la construction des ouvrages d'art.

Aujourd'hui le BAP est utilisé dans le monde entier, même en Amérique et en Afrique dans plusieurs constructions (les bâtiments civils et industriels, les ponts, les barrages, et les travaux de renforcement).

- **Avantages des bétons autoplaçants :**

Les raisons qui favorisent l'utilisation des BAP sont :

- L'emploi des BAP permet des gains de temps appréciables dans la réalisation des constructions, ainsi que l'amélioration de la productivité (De Schutter *et al*, 08).

- L'absence de vibration a pour effet de diminuer la ségrégation interne entre les particules solides et le liquide environnant, se traduisant par la réduction de la porosité entre pâte et granulats dans les zones de transition en particulier et l'amélioration de la durabilité.
- L'emploi des BAP en remplacement du béton ordinaire est devenu essentiel en raison des performances exigées pour certains types d'ouvrages nécessitant des volumes de renforts importants et des coffrages complexes, ce qui rend l'opération de vibration périlleuse (Okamura et Ouchi, 03).
- Les constructions réalisées en BAP présentent un bon aspect des surfaces, dû à l'utilisation des fines et la limitation de la dimension maximale du gros granulat permettant l'obtention d'un béton lisse et donne l'impression d'une meilleure finition.
- L'emploi de matériel de vibration du béton entraîne des nuisances sonores et des problèmes de santé comme la maladie des mains blanches, ce qui n'est pas le cas des BAP (RILEM, 01).
- L'industrie de préfabrication des produits en béton est devenue la plus grande utilisatrice des BAP en Europe (Skarendahl, 03).

- **inconvénients des bétons autoplaçants :**

La raison essentielle qui ne favorise pas l'utilisation des BAP est due au fait que l'utilisation de superplastifiant et de fines étant nécessaire, ceci se traduit par une augmentation du coût (The Concrete Society, 05).

Cependant, l'emploi des BAP pour la réalisation de grandes structures peut s'avérer économique dans la mesure où le coût supplémentaire engendré par les additions et les adjuvants est vite compensée par les gains réalisés sur la main d'œuvre et les délais d'exécution (Billberg, 99).

2. NOTIONS SUR LES BETONS AUTOPLAÇANTS

2.1. Définition

Les BAP sont des bétons spéciaux, fluides et homogènes, se mettent en place sous l'effet de leur poids propre et sans vibration interne ou externe, même dans des milieux très ferrailés. Ces nouveaux bétons sont qualifiés d'autoplaçant lorsque le matériau présente à l'état frais une grande fluidité et une bonne stabilité (absence de ségrégation ou de ressuage) et garantit à l'état durci une résistance mécanique au moins équivalente à celle d'un béton ordinaire.

2.2. Comparaison entre un béton ordinaire et un BAP

Comparativement au béton ordinaire, les BAP se caractérisent par une composition différente (figure 1.1) notamment :

- Volume de pâte : le dosage en ciment est pratiquement le même que celui des BO, cependant les BAP nécessitent un volume de pâte plus important obtenu par l'ajout de fines calcaire, laitier granulé etc...
- Le dosage en gros granulat est réduit jusqu'à une valeur permettant de ramener le rapport (Gravier / Sable) proche de 1.
- La taille maximale des gros granulats est généralement limitée pour éviter les risques de blocage.

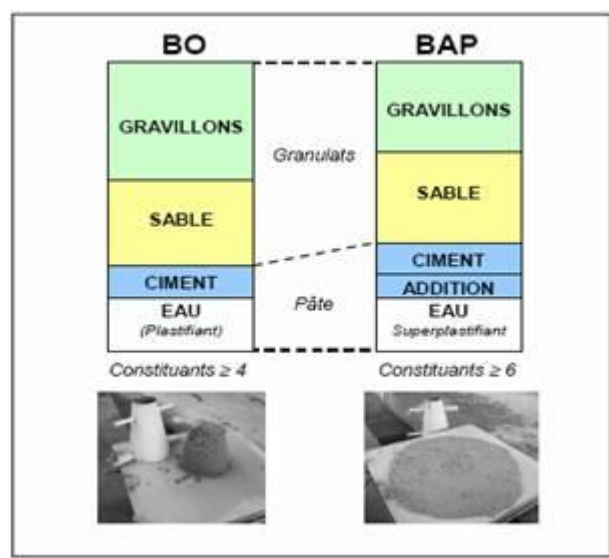


Figure 1.1. Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP (Okamura et al, 00)

Généralement, le BAP et le BO ont les mêmes volumes d'eau et des dosages en sable assez proches.

La pâte joue un rôle très important, écarte les granulats, réduit ainsi les frottements intergranulaires et sépare les gros granulats des armatures (figure 1.2).

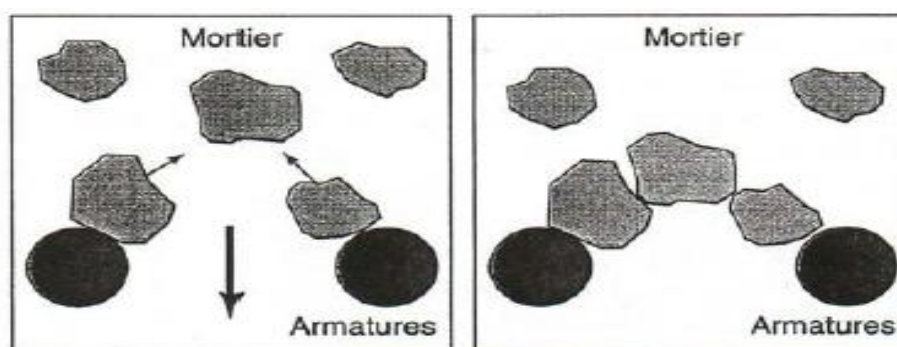


Figure 1.2. Phénomène de blocage d'un granulat (Chabil, 09)

Les éléments fins peuvent aussi assurer un arrangement entre stabilité et maniabilité. Mais il est difficile d'obtenir une fluidité accessible au BAP, il est donc indispensable d'ajouter aux BAP un défloculant comme des superplastifiants. Il est aussi, possible d'ajouter un agent de viscosité au mélange si nécessaire parce que les éléments fins ne sont pas toujours suffisants pour éliminer le risque de ségrégation. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de molécules organiques, qui rendent la viscosité de l'eau plus élevée et garantissent aussi une bonne stabilité du mélange (Loukili et Turcry, 03 ; Rols *et al*, 98). Cependant, le surcoût de ces agents rend leur utilisation peu répandue.

2.3. Paramètres influençant la formulation d'un BAP

2.3.1. Un volume de pâte élevé

La capacité au remplissage des BAP est influencée par les frottements entre les granulats qui peuvent provoquer un phénomène de blocage. L'augmentation du volume de pâte (ciment + addition + eau + Adjuvant + air) est nécessaire pour écarter les granulats. En effet, le volume de pâte des BAP est élevé et varie de 330 à 400 (l /m³) (Assié, 04).

2.3.2. Une quantité de fines (< 80 µm) importante

Afin d'obtenir une maniabilité remarquable sans signes de ségrégation ou de ressuage, les BAP doivent avoir une quantité de fines élevée de l'ordre de 500 kg/ m³) supérieure à celle des bétons ordinaires (Assié, 04). Pour garantir un volume de pâte suffisant deux possibilités sont offertes :

- La première consiste en l'augmentation du dosage en ciment, ce qui induit un surcoût sur le plan économique et des risques de fissuration par une exothermie importante sur le plan technique.

- La deuxième voie consiste en l'emploi de diverses additions minérales qui sont le plus souvent des sous produits ou des déchets tels que le filler calcaire et le laitier de haut fourneau.

2.3.3. L'emploi de superplastifiant

Les superplastifiants sont des produits ajoutés en très faible quantité aux bétons (dose inférieure à 5% du poids de ciment). Ils sont ajoutés avant ou pendant le malaxage, dans le but d'améliorer les propriétés des bétons à l'état frais, surtout la fluidité.

Les superplastifiants rendent le mélange de béton plus fluide par la dispersion des particules de ciment et les empêchent d'être assemblées au contact de l'eau de gâchage. Cette dispersion est produite par des molécules plastifiantes du même signe qui sont collées à la surface des particules de ciment.

La répulsion électrostatique rend l'hydratation du ciment largement plus poussée, ce qui entraîne par la suite un gain de résistance du béton (figure 1.3).

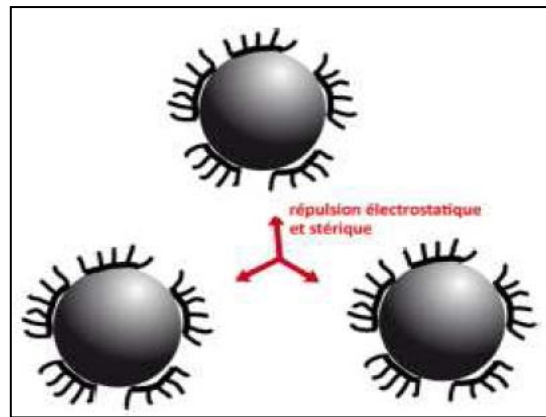


Figure 1.3. Répulsion électrostatique entre les particules de ciment (Diederich, 10)

2.3.4. Utilisation d'un agent de viscosité

Le rôle d'un superplastifiant est l'amélioration de l'ouvrabilité du béton mais sa viscosité plastique sera diminuée. Pour régler ce problème, un agent de viscosité doit être ajouté au BAP (Assié, 04). Ce sont des dérivés cellulosiques, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui entrent en réaction avec l'eau pour augmenter sa viscosité. Ces produits permettent d'éviter la ségrégation et le ressuage afin d'obtenir une pâte plus dense en fixant l'eau dans le béton. Ils sont utilisés surtout pour des rapports E/L élevés et lorsque les additions ne sont pas suffisantes pour rendre le béton plus homogène. Ils ont aussi la possibilité de réduire la sensibilité des BAP aux changements de la teneur en eau (problèmes de ressuage et de ségrégation), cependant ils peuvent aussi réduire la fluidité des bétons.

2.3.5. Un faible volume de gravillon

Les granulats concassés ou roulés sont utilisés pour la formulation des BAP. Le volume des granulats doit être diminué parce que les gravillons entraînent le blocage du béton mais ils augmentent par ailleurs la compacité du béton ce qui permet d'obtenir une résistance remarquable. Généralement, le rapport (G / S) dans un BAP est de l'ordre de 1 (Assié, 04). Ce rapport peut être diminué si l'ouvrage est fortement ferrailé.

Dans un BAP la dimension maximale des gravillons ne doit pas dépasser 16 mm pour éviter le phénomène de blocage (Assié, 04).

3. ADDITIONS MINÉRALES UTILISÉES DANS LES BAP

Les additions minérales les plus utilisées dans les BAP sont :

3.1. Fillers calcaires

Ils sont obtenus par broyage de roche calcaire. Ces additions minérales possèdent un effet physico-chimique. Ils accélèrent l'hydratation du clinker. Néanmoins cet effet est notable à court terme (Buil et Ollivier, 93).

Les fillers calcaires sont des matériaux locaux (déchets de carrière), ils présentent des qualités de conformité. En générale, ils ont une couleur claire les rendant convenables à l'obtention des parements de bonne qualité (Buil et Ollivier, 93).

Les fillers calcaires présentent les avantages suivants :

- Diminution de la porosité du béton et amélioration de la résistance.
- Réduction du dosage en ciment et diminution du coût final du liant.
- Diminution des risques du ressuage.
- Amélioration de la maniabilité des bétons.

3.2. Laitier de haut fourneau

C'est un résidu issu de la fabrication de la fonte dans le haut fourneau. On atteint généralement une proportion moyenne de 300 kg de laitier pour une tonne de fonte produite avec un minerai riche en fer. La composition typique du laitier de fonte est de 40% de chaux, 35% de silice, 11% d'alumine et 8% de magnésie.

Le laitier est utilisé principalement dans la fabrication des ciments et des bétons. Selon le mode de refroidissement choisi, on trouve deux formes minéralogiques différentes de laitier :

- **Le laitier granulé :**

Obtenu par refroidissement rapide (trempe à l'eau) : possède une structure vitreuse riche en énergie lui conférant une hydraulicité latente. La vitrification du laitier granulé par la trempe confère au matériau son pouvoir hydraulique latent. Un broyage fin du laitier lui permet d'être utilisé comme addition dans les ciments et les bétons.

- **Le laitier cristallisé :**

Obtenu par refroidissement lent, possède une structure minéralogique cristalline stable et son hydraulicité si elle existe n'est que modeste.

L'utilisation du laitier reste cependant limitée en Algérie au domaine de la cimenterie en raison de son faible pouvoir hydraulique. Le laitier granulé procure au matériau des performances mécaniques et une durabilité accrue (Behim, 05), c'est pourquoi les ciments au laitier sont particulièrement indiqués pour les bétons soumis à des ambiances agressives.

3.3. Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules ultrafines, elles sont composées d'une grande teneur en silice (SiO_2) amorphe. Elles résultent de la réduction de quartz par du charbon dans les fours électriques utilisés pour la production de silicium. Ces fumées ont des effets pouzzolaniques. Des auteurs (Shi *et al*, 98), affirment qu'elles rendent les mélanges plus visqueux en améliorant la compacité des bétons, mais pour Carls Ward (Carls *et al*, 03), les fumées de silices ne changent pas la viscosité du béton à l'état frais.

La fumée de silice permet de fabriquer des :

- BHP et BTHP.
- Bétons résistants aux milieux agressifs.
- Bétons projetés.

La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Améliore les caractéristiques mécaniques à longs termes.
- Améliore la résistance à l'érosion.
- Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- Diminue la perméabilité aux gaz.

3.4. Cendre volante

Ce sont des fines particules assemblées lors du dépoussiérage des gaz résultant de la combustion du charbon pulvérisé, utilisé dans les centrales thermiques.

La cendre volante est composée des éléments suivants : le silicium, l'aluminium, le calcium et le magnésium.

Les cendres volantes peuvent entrer en réaction avec l'hydroxyde de calcium pour produire des silicates de calcium hydratés par effet pouzzolanique (Karouite, 03).

Les cendres volantes sont utilisées dans les ciments et les bétons :

- Pour préparer la matière première (le cru), en remplaçant de l'argile et après le broyage final (avec le clinker et le gypse).
- Amélioration de l'ouvrabilité, de la plasticité et de la compacité des bétons. Elles facilitent le remplissage des moules ce qui entraîne un bon aspect de la surface au démoulage.
- L'ajout des cendres volantes permet de diminuer le dosage en eau, d'éviter le ressuage et d'améliorer la durabilité des bétons (Karouite, 03).

4. EFFETS PHYSICO-CHIMIQUES DES ADDITIONS

4.1. Effet filler ou effet de remplissage

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente. Cet accroissement de la résistance est appelé effet filler (Behim, 05).

4.2. Effet chimique ou pouzzolanique

L'activité chimique est le résultat de réactions chimiques entre une ou plusieurs phases du ciment et l'addition minérale. Par exemple les cendres volantes donnent lieu à la réaction

pouzzolanique qui est elle-même une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale de type cendre volante ou fumée de silice, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment.

La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium hydraté sous produit de la formation du CSH du clinker (Behim, 05).

4.3. Effet physique ou de surface

L'introduction d'une addition minérale même inerte peut augmenter la résistance à court terme. Beaucoup d'auteurs (Behim, 05) ont confirmé cet effet sur des pâtes de ciment et des mortiers. Cette action est appelée (germination hétérogène).

La formation d'une couche d'hydrates autour d'un grain de ciment anhydre présente une faible épaisseur, l'hydratation du cœur anhydre, par diffusion, est alors facilitée. Ce qui entraîne une amélioration de l'hydratation du ciment. L'hydratation est alors accélérée et grâce à des phénomènes de surface (germination hétérogène), l'augmentation de la finesse d'une addition entraîne une amélioration de la résistance (Behim, 05).

5. METHODES DE FORMULATION DES BAP

5.1. Pratique actuelle de la formulation des BAP

Plusieurs méthodes de formulation des BAP existent. Elles sont basées sur des approches expérimentales. L'association Française de Génie Civil (AFGC, 08) recommande un certain nombre de critères permettant de faciliter le travail des formulateurs :

- Le volume de gravillon 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 de 300 à 350 kg/m³.
- La masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

5.2. Quelques approches de formulation des BAP

Jin (Jin, 02) affirme qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays. Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde, on peut citer :

5.2.1. Méthode Basée sur l'optimisation des Mortiers

Cette méthode est basée sur les critères suivants (Okamura et al, 00) :

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

Les quantités de gravillon 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 gravillon 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 (Turcry, 04). 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.

5.2.2. Méthode basée sur l'optimisation du volume de pâte

Généralement, le béton est composé d'une phase solide (granulats) et une phase liquide (pâte), cette phase joue un rôle très important dans un BAP. Le but de cette méthode est de déduire le volume de pâte optimal pour obtenir un BAP fluide et d'éviter les risques de ségrégation (S.G. Oh *et al*, 99).

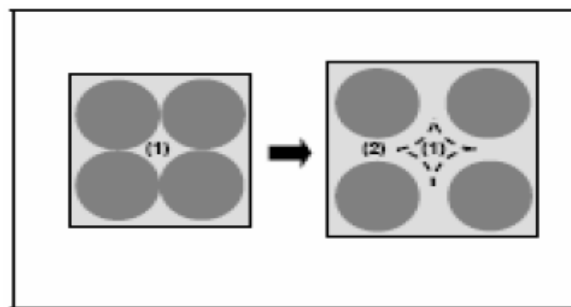


Figure 1.4. Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

Cette technique consiste à trouver des relations entre l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité plastique). Durant la formulation, il est nécessaire de déterminer la rhéologie de la pâte pour optimiser le dosage minimal de pâte qui offre au béton une fluidité acceptable (S.G. Oh *et al*, 99).

5.2.3. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible du squelette granulaire (De Larrard et Sedran, 99). Elle permet d'évaluer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel Bétonlab Pro, qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment (Baron et Ollivier, 96).

Turcry (Turcry, 04) a commencé de réaliser des BAP en se basant sur des procédés semi expérimentaux. Il a signalé que la méthode de la minimisation du volume de la pâte entraîne un phénomène de blocage. Il a confirmé aussi que l'approche de l'optimisation du squelette granulaire est la plus qualifiée pour obtenir un BAP de qualité. Mais, sa réalisation nécessite l'utilisation d'un logiciel Bétonlab Pro et d'équipements informatiques.

5.3. Exemples de compositions des BAP

Le tableau suivant montre les différentes compositions des BAP réalisées en France (Turcry, 04) :

Tableau 1.1. Exemples de différentes compositions utilisées en France

Ciment (kg/m³)	Filler (kg/m³)	Gravillon (10-14) (kg/m³)	Gravillon (5-12,5) (kg/m³)	Sable (kg/m³)	Eau (Kg/m³)	SP (kg/m³)
451	59	557	299	858	182	6,98
385	120	563	302	867	174	6,24
312	186	566	304	872	169	5,38
480	0	568	305	918	166	7,20
475	0	562	302	909	174	7,13

6. CARACTÉRISATION DES BAP A L'ETAT FRAIS

L'ouvrabilité et la stabilité sont des propriétés essentielles dans un béton autoplaçant et sa détermination nécessite plusieurs essais. Ces propriétés se composent de trois caractéristiques principales :

- mobilité en milieu non confiné.
- mobilité en milieu confiné.
- stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

6.1. Mobilité en milieu non confiné

6.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump flow)

Pour la détermination de l'étalement (figure 1.5), on utilise le même cône que celui utilisé pour l'essai d'affaissement (PNB, 05). La description de l'essai est présentée dans le deuxième chapitre.

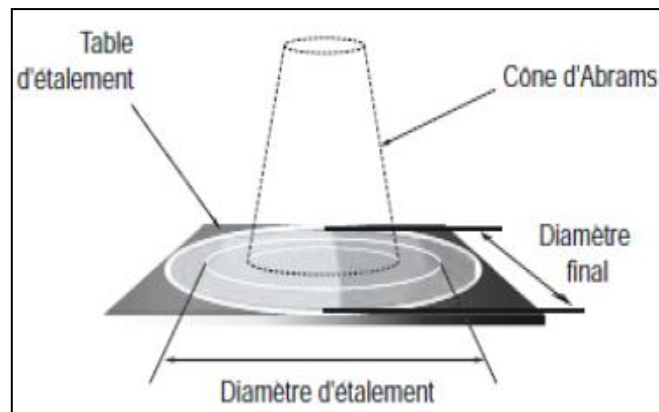


Figure 1.5. Essai au cône d'Abrams.

6.1.2. Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel)

L'essai au V-Funnel permet de mesurer le temps d'écoulement (Emborg, 99). L'entonnoir est rempli de béton jusqu'en haut (12 litres). Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui encourage l'écoulement du béton pour calculer le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir soit vidé (figure 1.6).

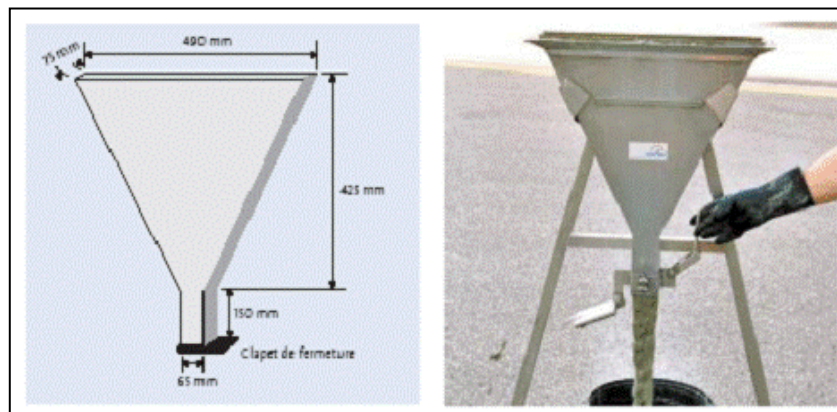


Figure 1.6. Essai d'écoulement à l'entonnoir (V-Funnel).

Généralement, Le temps d'écoulement est utilisé pour mesurer la viscosité du BAP, plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible et sa fluidité est remarquable (Utsi *et al*, 03 ; Jin, 02).

6.2. Mobilité en milieu confiné

Pendant la mise en place, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Premièrement, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage est terminé, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise.

On dit une ségrégation dynamique lorsqu'on remarque une séparation entre la phase solide et la phase liquide pendant le coulage dans les moules ou les coffrages. Par contre, une ségrégation statique se produit lorsque le mélange est coulé et jusqu'à la prise. La ségrégation

réduit les propriétés du béton durci (résistance mécanique et durabilité) et souvent elle est suivie d'un ressuage d'eau.

6.2.1. Essai a la boîte en U (U-BOX TEST)

Pour cet essai, la partie la plus haute est remplie de béton, puis la trappe est ouverte pour permettre le coulage du béton à travers des armatures de 13 mm de diamètre et ainsi la deuxième partie de la boîte en U est remplie (figure 1.7).

Ce test nous aide à étudier la mobilité du béton en milieu confiné et d'assurer que le coulage du béton ne sera pas gêné par des problèmes de blocage des gros granulats. Généralement, un BAP a une hauteur de remplissage supérieure ou égale à 30 cm (Jin, 02).

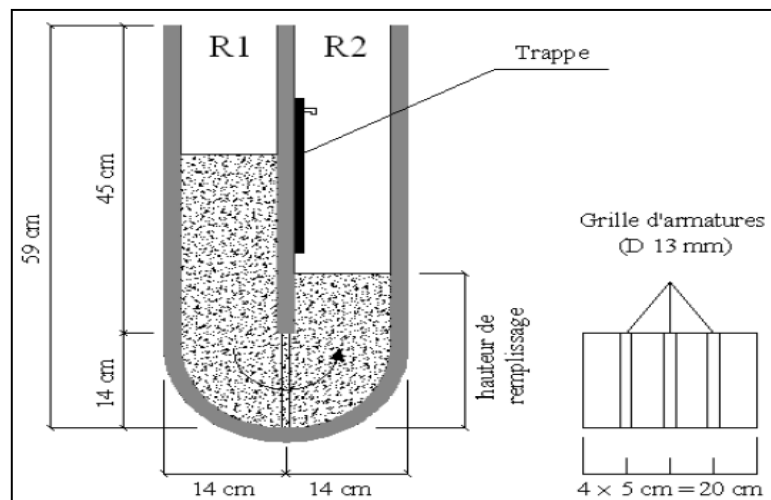


Figure 1.7. Schématisation de l'essai du tube en U.

6.2.2. Essai d'étalement modifié (J-ring)

Dans ce test, le béton est coulé à travers des barres d'armature, ce qui nous aide à étudier la capacité de résistance d'un béton au phénomène de blocage. Le mélange s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Cet anneau de 300 mm de diamètre contient des barres d'armatures de 16 à 18 mm de diamètres avec un espacement de deux fois et demi leur diamètre (figure 1.8).

L'homogénéité doit être respectée par une bonne distribution des granulats (EFNARC, 02). On définit aussi le comportement du béton (son enrobage et sa résistance à la ségrégation).

Le BAP offre une fluidité remarquable et un bon enrobage des armatures avec un faible risque de ségrégation, quand il passe à travers l'anneau de façon homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

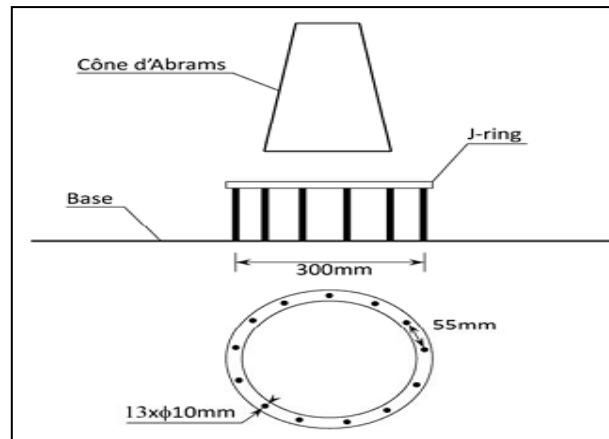


Figure 1.8. Essai d'étalement modifié (J-ring).

6.2.3. Essai a la boîte en L

Ce test est recommandé par l'AFGC (AFGC, 08). Il permet d'étudier la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas gênée par des phénomènes de blocage (PNB, 05). Le mode opératoire de l'essai est décrit en détail dans le deuxième chapitre.

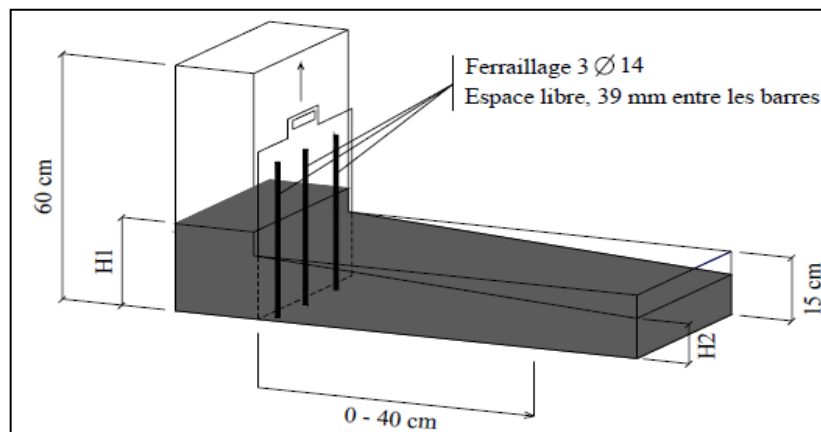


Figure 1.9. Schématisation de la boîte en L.

6.2.4. Essai de la passoire

Cet essai permet d'étudier l'écoulement du béton pendant qu'il traverse une grille d'armatures espacées de 5 cm. Il sert à repérer les phénomènes de blocage pour vérifier la capacité de passage du béton.

Un volume de 30 litres de béton est versé dans un récipient qui contient une grille d'armature dans la partie inférieure (figure 1.10). Ensuite, le récipient est soulevé verticalement pour laisser le béton s'écouler à travers la grille d'armatures. La surface supérieure du mélange subit une pression pour vérifier le comportement du béton à des

situations d'écoulement différentes (Skarendahl *et al*, 01). Cet essai est peu utilisé parce qu'il demande un volume de béton élevé et un temps d'écoulement important.

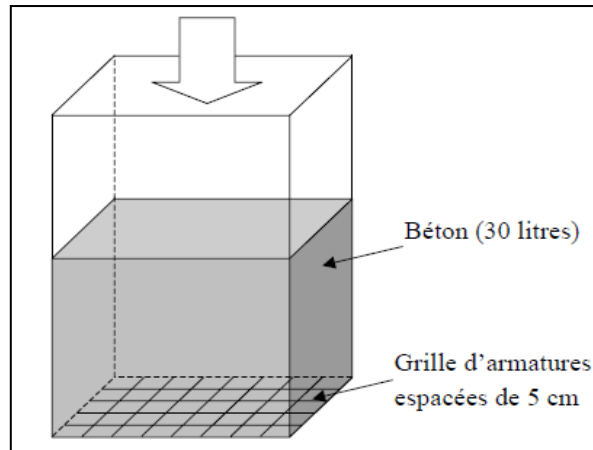


Figure 1.10. Essai de la passoire.

6.3. Stabilité

6.3.1. Essai de stabilité au tamis

Cet essai est proposé dans les recommandations provisoires de (AFGC, 08). Il permet de quantifier la laitance d'un BAP et par conséquent sa stabilité. La description détaillée de l'essai de stabilité au tamis (figure 1.11) est présentée dans le deuxième chapitre.

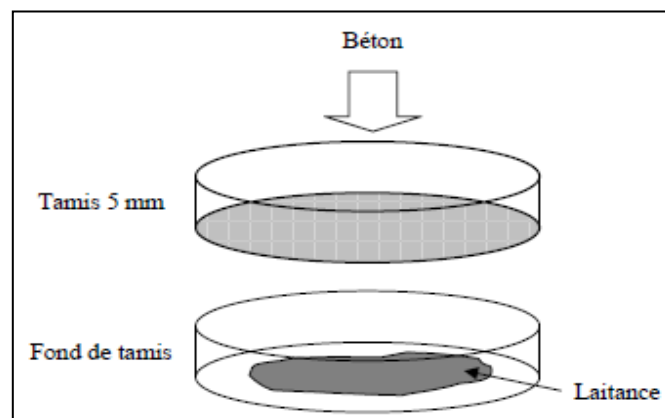


Figure 1.11. Schématisation de l'essai de stabilité au tamis

6.4. Limite d'acceptation des essais

Les essais précédents sont recommandés par l'association française du génie civil (AFGC, 08).

- les valeurs d'étalement sont généralement fixées de 55 à 85 cm (NF EN 12350 – 8, 10).
- le temps d'écoulement au V-Funnel est compris entre 8 et 14 secondes, conseillées pour les BAP.

- le taux de remplissage de la boîte en L (H_2/H_1) doit être supérieur à 0,8 (NF EN 12350 – 10, 10).
- la hauteur de remplissage de la boîte en U (U-Box) doit être supérieure à 300 mm.
- la différence entre l'étalement seul et un essai combiné : étalement et J-ring ne doit pas dépasser 50 mm.
- la stabilité au tamis doit être inférieure à 15% pour obtenir une stabilité acceptable (NF EN 12350 – 11, 10).
- La valeur limite de ressuage recommandée doit être inférieure ou égale à 3 % en volume.

7. CORRÉLATION ENTRE LES ESSAIS EMPIRIQUES ET LES MESURES RHÉOLOGIQUES

La caractérisation d'un BAP demande un certain nombre d'essais afin de cerner toutes leurs différentes propriétés à l'état frais. Des essais qui demandent pour certains, un temps d'attente désagréable comme celui de la stabilité au tamis (plus de 15 minutes avant d'avoir un résultat) ; à ceci s'ajoute la nécessité de faire l'ensemble de ces essais en simultanément, ce qui se traduit par un volume plus important de béton afin de couvrir la demande de tous les essais et un nombre plus importants d'opérateurs, sans oublier les essais rhéologiques qui doivent être entamés en même temps que les essais d'ouvrabilité (Ali Boucetta, 14).

C'est dans cette optique, des travaux de recherches ont été réalisés, aboutissant à des corrélations qui relient les différentes mesures rhéologiques et d'ouvrabilité et parfois même des paramètres de rhéologie ou bien d'ouvrabilité entre eux.

La corrélation rhéologie-ouvrabilité la plus utilisée est celle entre la viscosité plastique et les deux grandeurs d'ouvrabilité : T_{50} et T_{VF} (respectivement : temps de passage au diamètre de 50 cm d'étalement au cône d'Abrams, et temps d'écoulement à l'entonnoir V-funnel). Ainsi, (Emborg, 99 ; Grunewald et Walraven, 03) qui ont employé des viscosimètres de type BML avec un rhéomètre de type RheoCAD, garantissent ces relations (figure 1.12).

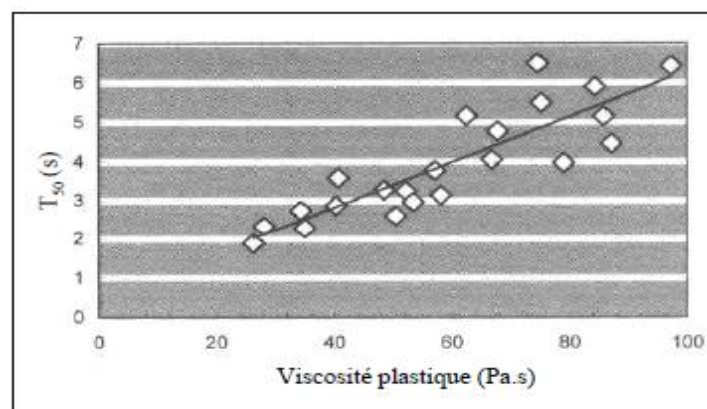


Figure 1.12. Corrélations viscosité- T_{500}

La viscosité plastique et le seuil de cisaillement peuvent être mesurés grâce aux essais réalisés sur les BAP à l'état frais. (Sedran, 99) a proposé une relation qui souligne la corrélation entre la viscosité plastique et le temps d'étalement T_{500} :

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0,0268 Sf - 2,39) T_{500} \quad (1.1)$$

μ : la viscosité plastique du matériau en (Pa.S).

ρ : la masse volumique du béton (Kg/m^3).

Sf : l'étalement en (mm).

T_{500} : le temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (en seconde).

Il existe une relation entre le seuil d'écoulement et l'étalement d'un BAP. (Wallevik, 03 ; Jin, 02) ont recommandé des expressions permettant de calculer le seuil d'écoulement (τ_0) d'un BAP à partir de la mesure d'étalement (D) au cône d'Abrams. La formule proposée est la suivante :

$$\tau_0 = \frac{\rho g V_{\text{cône}} 10^8}{25\sqrt{3} \pi D} \quad (1.2)$$

g : accélération de la pesanteur.

$V_{\text{cône}}$: volume du cône d'Abrams.

D : étalement au cône d'Abrams (mm).

Il existe aussi une nouvelle méthode pour mesurer le seuil de cisaillement d'un BAP qui garantit toutes les exigences théoriques. Cet essai est appelé **Essai à la boîte LCPC** (Roussel, 07).

7.1. Essai à la boîte LCPC (LCPC Box)

Pour le cas des BAP, nous présentons la possibilité de remplacer à un essai sur plaque par un essai dans un canal (figure 1.13).

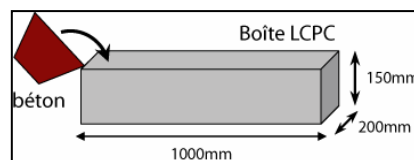


Figure 1.13. Dispositif de la boîte LCPC

Cet écoulement clairement bidimensionnel donne la même information sur l'étalement réalisé sur un demi-diamètre de la galette produite par le matériau. Il permet de vérifier les épaisseurs de matériau à l'arrêt de l'écoulement. Un volume total de 6 litres (équivalent au cône d'Abrams) est utilisé pour les BAP. C'est un test rapide, facile, économique et assuré pour calculer le seuil de cisaillement des BAP.

- **Protocole opératoire de l'essai :**

- Remplir un récipient humidifié muni d'un bec verseur de 6 litres de béton autoplaçant.
- Verser lentement le BAP à une des extrémités de la boîte (la vidange du récipient doit prendre environ 30 s).
- Attendre jusqu'à ce que l'écoulement arrête (environ 2 mn), mesurer la longueur d'étalement L dans la boîte.
- Lire le rapport τ / ρ sur l'abaque présentée sur la figure 1.14.
- τ : seuil d'écoulement (Pa).
- ρ : densité (g/cm^3).

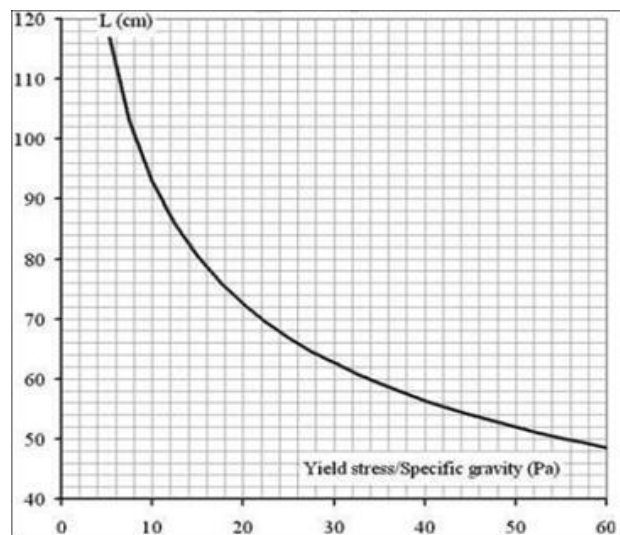


Figure 1.14. Relation entre longueur d'étalement et seuil d'écoulement (Roussel, 07).

8. CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES BAP

Les caractéristiques rhéologiques du béton comme par exemple la viscosité plastique est essentielle pour étudier les propriétés des mélanges à l'état frais.

Un matériau présente un comportement rhéologique viscoplastique (figure 1.15), lorsque son écoulement ne se produit qu'après des valeurs importantes de contraintes, nommée seuil de cisaillement (τ_0).

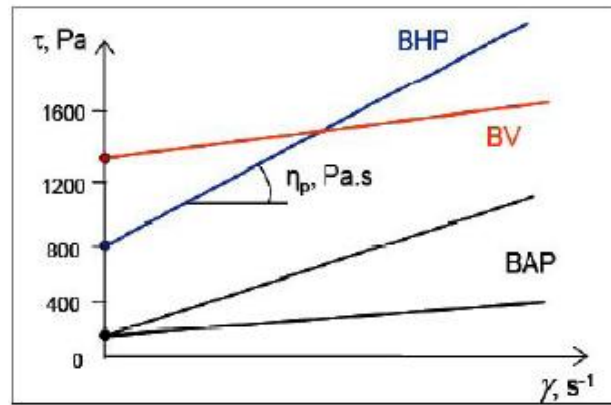


Figure 1.15. Exemple de comportement rhéologique pour différents types de béton (Assié, 04).

Un fluide peut être appelé Binghamien (Toutou *et al*, 04), lorsque la courbe d'écoulement est une droite, on applique aussi la relation suivante :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (1.3)$$

τ : la contrainte de cisaillement (Pa).

τ_0 : le seuil de cisaillement (Pa).

μ : est la viscosité plastique (Pa.S).

γ : la vitesse de déformation (S^{-1}).

D'autres auteurs ont ajouté trois grandeurs intrinsèques (τ_0 , k , n) qui facilitent la détermination de l'écoulement d'un matériau si ce dernier peut rester homogène (sans risque de ségrégation ou de ressuage). Donc, la contrainte de cisaillement τ (Pa) entre en relation avec la déformation γ (S^{-1}) grâce à la formule suivante :

$$\tau = \tau_0 + k \gamma^n \quad (1.4)$$

K : paramètre de viscosité.

n : Indice.

Si $n > 1$ le matériau est dit rhéo-épaississant.

Si $n < 1$ le matériau est dit rhéo-fluidifiant.

Si $n = 1$ le matériau est dit binghamien.

De Larrard *et al* (De Larrard *et al*, 98) ont expliqué que la plus part des bétons étaient des matériaux rhéo-fluidifiants. Les étalements des BAP mesurés à l'aide du cône d'Abrams, se situent entre 600 et 800 mm (figure 1.16).

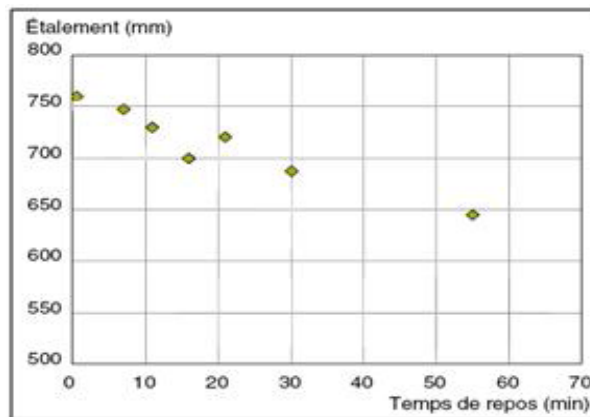


Figure 1.16. Etallement au cône d'Abrams en fonction du temps de repos (Toutou *et al*, 05).

9. PROPRIÉTÉS DES BAP À L'ÉTAT DURCI

9.1. Performances mécaniques des BAP

Plusieurs recherches ont montré que les granulats modifient la structure du béton et influent sur ses déformations (De Larrard et Roy, 92). Pour expliquer ce phénomène, on peut dire que le béton est un matériau composite qui contient deux phases, composé d'une matrice, la pâte de ciment, et d'inclusions, les granulats. L'étude des propriétés du béton (retrait) dépend des caractéristiques élastiques de chaque phase et de leur volume. Généralement, le volume élevé de la pâte rend les BAP plus déformables que les bétons ordinaires.

9.1.1. Résistance mécanique

De nombreuses études ont été menées sur les propriétés mécaniques des BAP contenant des fillers calcaires comparées aux bétons traditionnels (Gibbs et Zhu, 99 ; Pera *et al*, 99). Les résultats qui s'en dégagent montrent que la résistance à la compression des BAP à long terme est supérieure à celle du BV correspondant à des rapports E/C constants ou E/L identiques (figure 1.17).

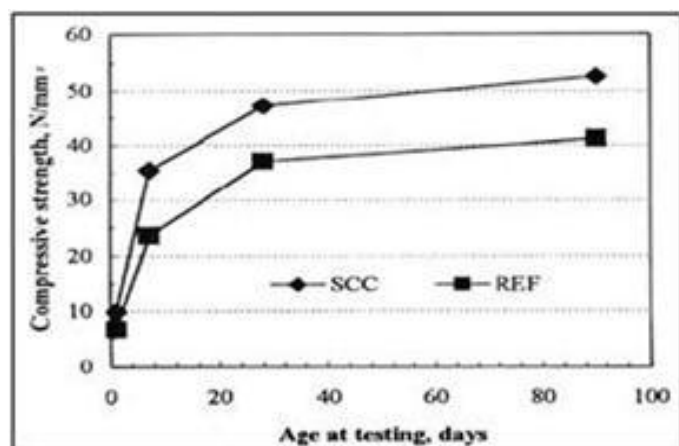


Figure 1.17. Evolution de la résistance mécanique d'un BAP et d'un BV (Gibbs et Zhu, 99)

La figure 1.17 montre une accélération de la résistance mécanique au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Cette accélération s'explique par l'hydratation favorisée par les petites particules du filler et ceci d'autant plus remarquable que la finesse du filler est importante (Petersson, 01).

Plusieurs données (Sonebi et Bartos, 99) ont été publiées sur l'évolution de la résistance mécanique en compression des BAP avec des fillers calcaires comparée à celle des bétons traditionnels et supportent les affirmations précédentes.

9.2. Retrait

Les bétons vibrés ont un retrait endogène plus élevé que les BAP (les résultats donnent des valeurs entre 50 et 200 $\mu\text{m}/\text{m}$). Les BAP et les BO ont un retrait endogène semblable pour un même rapport E/C et l'addition minérale à un effet négligeable sur le retrait. Les résultats trouvés sur le retrait de séchage sont très partagés en deux parties, premièrement le BAP et le BO ont un retrait total semblable et deuxièmement Turcry et Boukni (Turcry, 04 ; Boukni, 07) remarquent que les BAP donnent un retrait de séchage supérieur à celui des BO est ceci parce que le BAP contient un volume de fine élevé.

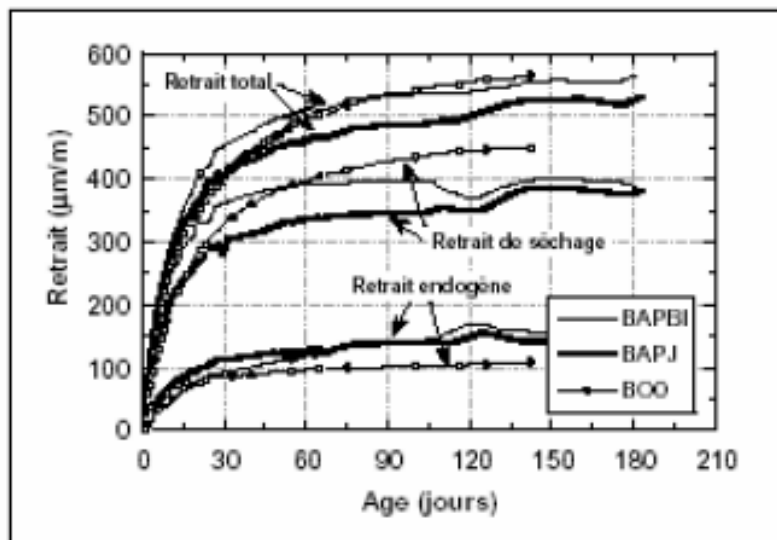


Figure 1.18. Retraits des BAP_{BI} (E/C=0,50), BAP_J (E/C=0,43) et BO_O (E/C=0,45) (Turcry, 04).

9.3. Propriétés physico-chimiques et durabilité

Les transferts de matière (surtout les agents agressifs) entraînent des phénomènes de dégradation qui touchent les constructions à l'intérieur du béton qui reste un matériau poreux. Les propriétés de transfert du béton sont donc employées constamment comme paramètre de durabilité. Les pores de la matrice cimentaire et les interfaces pâtes - granulats jouent un rôle d'intermédiaire pour la diffusion du gaz et la pénétration d'eau ou d'autres fluides dans le béton.

Les trois phénomènes de transferts de fluides au sein du béton sont la perméabilité et la diffusion. La perméabilité est le transfert de la matière grâce un gradient de pression. La diffusion concerne le déplacement ionique sous l'action d'un gradient de concentration.

Les paramètres de composition comme la compacité et la nature du liant sont liées à la durabilité. Les règles adaptées pour les bétons autoplaçants sont les mêmes pour les bétons ordinaires (NF EN 206-1, 02).

L'effet des fines minérales sur la matrice cimentaire dépend de leur composition chimique et de leur finesse. Une addition plus fine conduit à une augmentation de la compacité du mélange en diminuant sa porosité (Ballivy, 99).

9.3.1. Absorption capillaire

L'absorption d'eau est définie par le transfert de liquides dans un matériau poreux grâce à des tensions de surface dans les capillaires. Ce phénomène n'est pas attaché uniquement à la porosité du matériau mais aussi à son humidité. En général, l'absorption d'eau à l'intérieur d'un béton sec dépend de deux grandeurs, la porosité effective du matériau et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité).

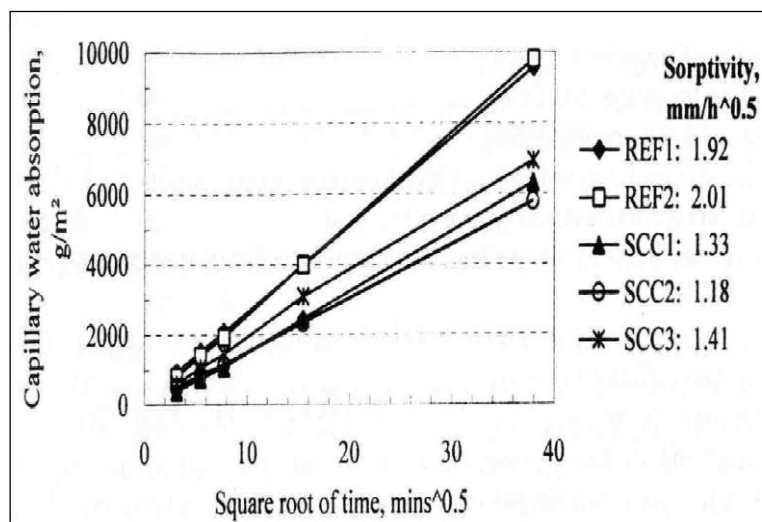


Figure 1.19. Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés (REF), (Zhu *et al*, 01)

Zhu *et al* (Zhu *et al*, 01) affirment que l'absorption capillaire des BO est supérieure à celle des bétons autoplaçants et ces bétons peuvent avoir des propriétés remarquables s'ils contiennent des laitiers ou des fillers calcaires (figure 1.19).

9.3.2. Carbonatation

La vitesse de propagation de la carbonatation est influencée par plusieurs facteurs, certains sont internes (la composition du béton) et d'autres sont externes (liés à

l'environnement). On peut citer alors, le rapport E/C, le pourcentage du CO₂, la température et l'humidité (Sakata, 98).

Les premiers tests réalisés sur des bétons ordinaires et des bétons autoplaçants montrent qu'il n'existe pas une différence importante entre leurs cinétiques de carbonatation (figure 1.20).

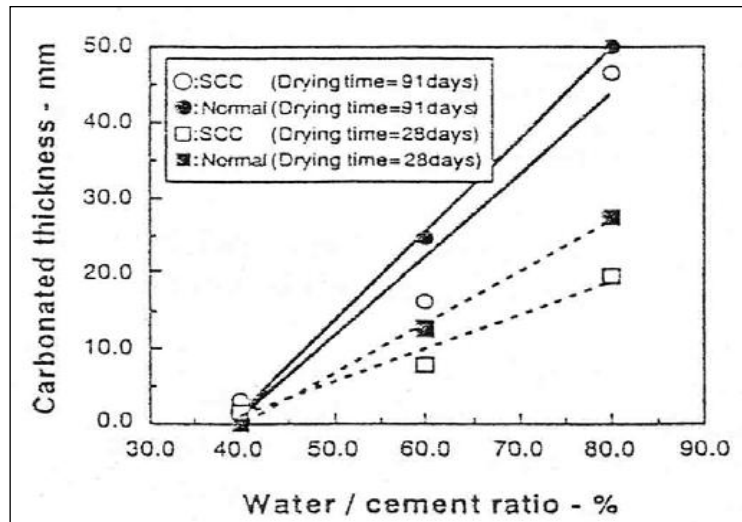


Figure 1.20. Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C (Sakata, 98).

D'autres travaux (Audenaert et De Schutter, 03) présentent des résultats semblables. Généralement, les BAP ont le même comportement que les bétons ordinaires.

10. LES FIBRES

10.1. Différents types de fibres

L'introduction des fibres dans le béton entraîne une amélioration des caractéristiques mécaniques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la fabrication des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leur nature et leur propriété mécanique :

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

Les fibres présentent des caractéristiques et des propriétés différentes : forme des fibres (plate, ondulée...), état de surface (lisse, rugueuse...), dimensions (diamètre, longueur...) et l'adhérence qui garantissent des caractéristiques mécaniques spécifiques aux ouvrages renforcés de fibres.



Figure 1.21. Exemples des fibres d'acier, de carbone et de polypropylène

10.2. Propriétés générales des fibres

Les fabricants n'arrêtent pas d'améliorer les qualités et les caractéristiques des fibres en les modifiant pour augmenter leur ténacité, en diminuant ou agrandissant leurs extrémités pour rendre leur capacité d'ancrage plus efficace.

La norme (ACI, 02) a mentionné quelques caractéristiques essentielles des fibres comme : la concentration, la forme, la longueur, le diamètre, la densité, la résistance en traction, le module d'élasticité ou la déformation à la rupture, l'absorption d'eau, la contrainte d'adhérence. Le tableau 1.2 présente certaines caractéristiques physico-mécaniques des fibres utilisées dans le domaine des ouvrages d'art.

Tableau 1.2. Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres (Holmer et Vahan, 99).

Fibres	Diamètre (µm)	Densité (g/m ³)	Résistance à la traction (GPa)	Allongement de rupture (%)
Acier	5-500	7,8	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	1,5-3	80
Polypropylène	10-200	0,9	0,4-0,7	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	3	2,3
Carbone	5-9	1,7-2	2-3	0,5-1,5

10.3. Les fibres végétales

Les fibres naturelles d'origine végétale ont été utilisées pour la fabrication des briques renforcées par la paille. Dans les années 1970, le plâtre était le premier liant utilisé avec les fibres végétales. Le plâtre renforcé de fibres végétales a permis de réaliser plusieurs ouvrages (Khenfer, 90).

Actuellement le renforcement de béton par des fibres végétales est réalisé avec des méthodes récentes. Suite aux problèmes de santé causés par les fibres d'amiante, plusieurs

études sont dirigées vers le remplacement de celles-ci par des fibres naturelles (végétales), (Kriker, 05).

Les filières textile et automobile utilisent beaucoup les fibres naturelles d'origine végétale. Ces fibres présentent des avantages économiques et écologiques mais leur introduction dans le domaine du bâtiment demeure timide surtout en Europe. Par contre au Canada et au Japon elles sont très utilisées.

Les fibres végétales les plus utilisées sont la paille, le chanvre, le lin, le sisal et le bambou (figure 1.22). Ces fibres ont une structure creuse composée principalement de cellulose et possèdent une propriété très hydrophile. Les fibres végétales absorbent l'eau et ce caractère est très important en raison de la méthode de confection des bétons.



Figure 1.22. Exemples des fibres végétales (Hameed, 10)

10.3.1. Classification des fibres végétales

Suivant l'origine des fibres végétales, on peut citer: les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

10.3.1.1. Les fibres de feuilles

Elles sont obtenues à cause d'un rejet des plantes. Ces fibres sont faites par chevauchement de paquet qui enferme toutes les feuilles afin de rendre les fibres rigides et résistantes.

La fibre de feuille la plus utilisée est la fibre de sisal (Swamy *et al*, 84). Certains chercheurs ont constaté que ce type de fibre améliore les caractéristiques mécaniques de la matrice cimentaire (Nilson, 75).

10.3.1.2. Les fibres de tiges

Ces fibres sont obtenues dans les tiges des plantes. Elles possèdent une bonne rigidité. Ces fibres sont distribuées sous forme de paquet de cor, puis séparées grâce à un processus

spécial. Les fibres de tige sont utilisées pour le renforcement des bétons et la fabrication de textile et des cordes. Parmi ces fibres, on trouve : les fibres de jute, de lin et de chanvre (Coutts, 83).

10.3.1.3. Les fibres de bois

Ces fibres sont courtes, elles sont obtenues grâce à un broyage des arbres comme le bambou.

10.3.1.4. Les fibres de surface

Généralement, les fibres de surface se trouvent sur la surface de la tige des fruits, on peut citer : le coton et la noix de coco. La résistance à la flexion du ciment a été améliorée grâce à l'incorporation des fibres de coco (Bledzki et Gassan, 99).

10.3.2. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Les chercheurs (Bledzki et Gassan, 99 ; Tolèdo *et al*, 03) ont montré les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales présentées sur les tableaux 1.3 et 1.4.

Tableau 1.3. Les caractéristiques physiques des fibres végétales les plus utilisées.

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm³)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	- 0,08-0,30	1,5 0,75-1,07	- 67-92	- 190-250
Noix de coco	- 0,11-0,53	1,2 0,67-1,0	- 22-28	- 85-135

Tableau 1.4. Caractéristiques physiques et mécaniques des fibres végétales

Fibres	Densité (g/cm³)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)
Coton	1,5-1,6	7,0-8,0	587-597
Jute	1,3	1,5-1,8	393-773
Lin	-	2,7-3,2	345-1035
Chanvre	-	1,6	690
Sisal	1,5	2,6	278
Noix de coco	1,2	30	175

Les chercheurs (Bledzki et Gassan, 99) ont enregistré que la résistance à la traction des fibres végétales est relative à leur teneur en cellulose.

Le tableau 1.3 montre que les fibres végétales absorbent une grande quantité d'eau à la saturation. Nous distinguons sur le tableau 1.4 que les fibres ont des densités rapprochées, par

contre leur résistance à la traction est très variable. Alors, chaque fibre a une composition chimique et une structure différente.

10.3.3. Caractéristiques chimiques des fibres végétales

Les fibres végétales ont une composition chimique basée sur trois constituants: la cellulose, l'hémicellulose et la lignine (Bledzki et Gassan, 99).

10.3.3.1. Cellulose

La cellulose est la principale composante de la fibre végétale. C'est un polymère naturel et les fibres végétales sont formées par une chaîne de fibres en cellulose.

10.3.3.2. Hémicellulose

L'hémicellulose se trouve dans toutes les parois des fibres végétales. Ce constituant permet aux parois des fibres de s'allonger durant la croissance. Ce glucide complexe est responsable de l'élasticité des fibres.

10.3.3.3. Lignine

Elle représente la colle qui garantit la liaison entre les fibres végétales. C'est un polymère tridimensionnel.

Le tableau 1.5 résume la composition chimique des fibres végétales reproduit selon (Swamy, 86 ; Kriker, 05).

Tableau 1.5. Composition chimique de quelques fibres végétales

Fibres	Composition (%)			
	Cendre	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Noix de coco	1,44	32-43	0,15-0,25	40-45
Sisal	1,13	66-72	12	10-14
Jute	7,6	63	-	-
Palmier dattier	1,2	41-45	6-10	30-40

10.3.4. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Le comportement interne du béton peut être modifié avec la présence des fibres courtes et discontinues. Ces fibres peuvent se mélanger et se propager dans la matrice cimentaire de façon homogène.

La propagation de la fissure est empêchée par les fibres grâce à un effet de couture. Les fibres sont soumises à des efforts de traction entre les deux lignes de la fissure, puis, ces efforts sont renvoyés sur le matériau (mortier ou béton) par un effet d'adhérence avec les fibres ce qui retarde la fissuration du béton et augmente la résistance à la traction par flexion. Mais cette augmentation dépend des propriétés mécaniques et géométriques des fibres (Kriker, 05).

Le tableau 1.6 illustre les principaux avantages et inconvénients des fibres végétales :

Tableau 1.6. Avantages et inconvénients des fibres végétales

Avantages	Inconvénients
Ressource renouvelable	Faible résistance aux hautes températures
Demande peu d'énergie pour être produite	Absorption d'eau
Propriétés mécaniques importantes	Mauvaise tenue au vieillissement
Ne présentent pas de danger pour la santé	Demande la gestion d'un stock pour des applications industrielles
Faible densité et permettent des dosages plus importants	Faibles résistances aux acides
Ne sont pas sujettes au phénomène de corrosion	Nécessitent un traitement

10.4. Rôle des fibres

Les chercheurs ont commencé par introduire les fibres pour améliorer les propriétés mécaniques du béton comme la résistance à la traction par flexion, cependant le résultat obtenu était limité (Sukontasukkul, 04).

Les fibres ont un rôle essentiel dans le béton, il est présenté sous deux volets :

- Diminuer l'ouverture des fissures pour contrôler la propagation d'une fissure dans un béton en état de service, ce phénomène est présenté par la figure 1.23.a.
- Augmenter la sécurité du matériau lors des états de chargement ultimes par le changement du comportement fragile d'un béton en un comportement ductile (figure 1.23.b).

Généralement les fibres sont utilisées pour consolider la structure du béton en s'opposant à la croissance des fissures et à leur propagation. Selon le type de l'ouvrage et la nature du béton, les fibres présentent plusieurs avantages :

- Amélioration de l'adhérence du béton frais, les fibres rigides modifient la structure du squelette granulaire.
- Diminution de la microfissuration due aux variations dimensionnelles surtout au jeune âge.
- Diminution de la fissuration provoquée par une charge extérieure.
- Augmentation de la ductilité et la résistance à la traction.
- Augmentation de la résistance aux chocs et à la fatigue.

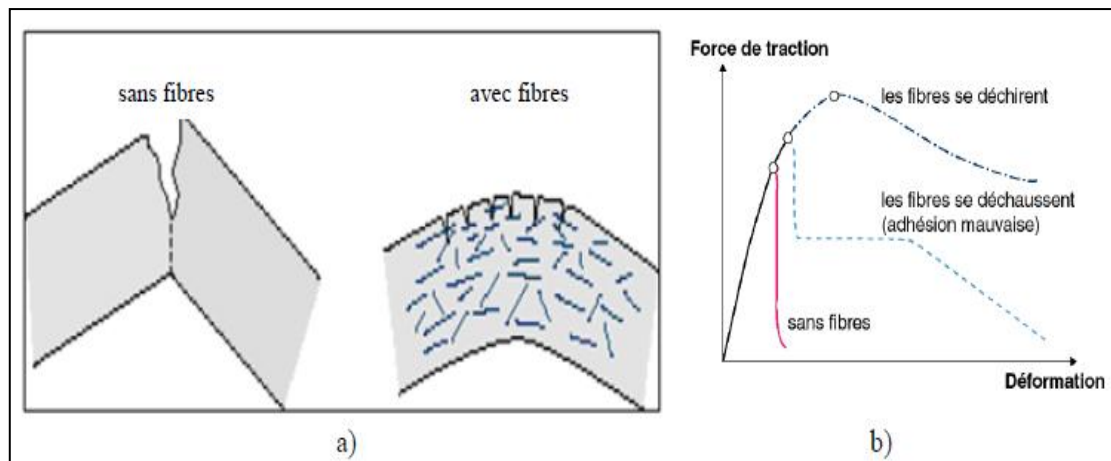


Figure 1.23. Présentation de l'apport du renfort par des fibres (Cotterell et Mai, 96).

10.5. Principe d'action des fibres

D'après (Rossi *et al*, 87), les fibres ont des actions qui se manifestent sur le matériau et la structure. Supposons un béton renforcé de fibres soumis à une force de traction. On peut remarquer 3 phases sur la courbe contrainte – déformation (figure 1.24).

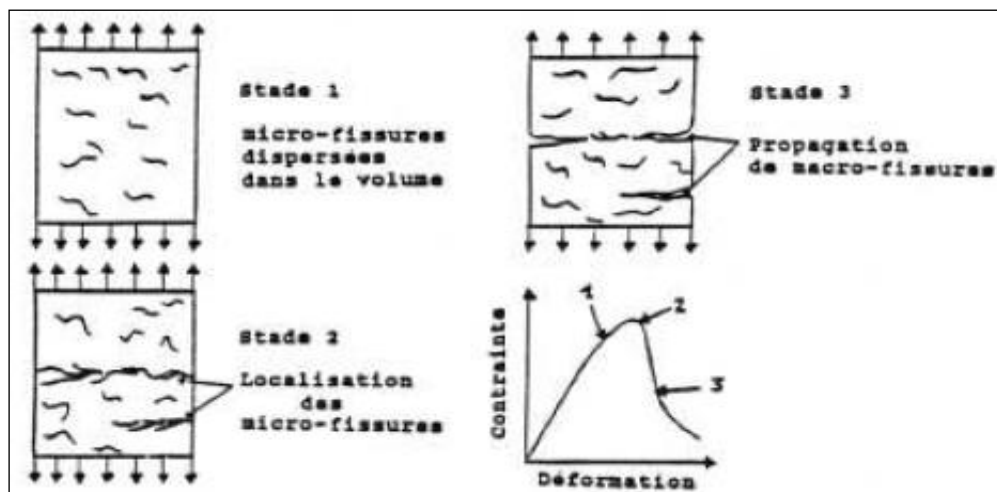


Figure 1.24. Processus de fissuration du béton

En observant la première phase, on peut remarquer la formation de microfissures qui se développent rapidement, surtout dans les interfaces granulat - matrice qui présentent une faible résistance mécanique. Ces fissures ont une largeur de l'ordre du micron, cependant leur longueur est de l'ordre du diamètre des granulats. Les fibres restent inactives pendant cette phase.

Le développement des macrofissures commence pendant la deuxième phase qui résulte de l'assemblage des microfissures. A cette étape, la propagation des fissures est limitée grâce au transfert des contraintes aux fibres. Cette phase est suivie par la propagation d'une macrofissure (phase 3) qui entraîne la séparation de l'éprouvette en deux parties ce qui conduit à la ruine du béton (Shah, 91 ; Banthia et Trottier, 94).

10.6. Processus de couture des fissures

D'après (Markovic *et al*, 03), l'objectif d'utilisation des fibres est d'améliorer la résistance à la traction et la ténacité des matériaux, mais pour (Kawamata *et al*, 03), les fibres sont ajoutées non pas dans le but d'augmenter la résistance à la traction, mais surtout pour limiter la fissuration et modifier le comportement du béton fissuré.

La force de traction entraîne la formation des fissures qui se développent dans le béton et les fibres peuvent les couvrir, ce qui se traduit par la diminution de l'ouverture des fissures et retarder ainsi leur propagation. Durant l'ouverture des fissures, les fibres ont la possibilité de se déformer ou glisser suivant leur nature, leur surface et leur géométrie.

10.7. Utilisation de deux ou plusieurs types de fibres

Les propriétés géométriques et mécaniques des fibres sont différentes selon la forme et la nature de la fibre. Le comportement mécanique d'un matériau peut être influencé par chaque type de fibre ce qui nécessite l'application des méthodes différentes.

Chaque type de fibre utilisé est donc fonction du béton réalisé et des résistances souhaitées. Lorsqu'on introduit deux types de fibres métalliques dans le même mélange, les fibres courtes ont un nombre supérieur que celui des fibres longues pour le même dosage et elles peuvent jouer le rôle de couture sur des microfissures qui se développent dans la première étape du chargement. Ces fibres sont donc généralement actives dans l'amélioration de la résistance à la traction.

L'augmentation de la charge encourage la propagation de l'ouverture des fissures. Ces microfissures entraînent l'arrachement des fibres courtes, tandis que les fibres longues augmentent la résistance à la traction et poursuivent le transfert des efforts à travers les fissures ce qui se traduit par l'amélioration de la ductilité du matériau (Kawamata *et al*, 03), (figure 1.25 a et b).

Des recherches réalisées par (Kawamata *et al*, 00) ont indiqué que le renforcement des bétons par des fibres métalliques n'est pas une solution contre la fissuration du béton, parce que l'introduction des fibres métalliques à caractère adhérent avec une grande rigidité et résistance en traction par flexion n'a pas permis d'empêcher la provocation d'une séparation fragile d'une éprouvette en béton sollicitée en flexion.

Ainsi, il est nécessaire d'utiliser d'autres types de fibres comme les fibres de verre, de carbone ou bien les fibres végétales.

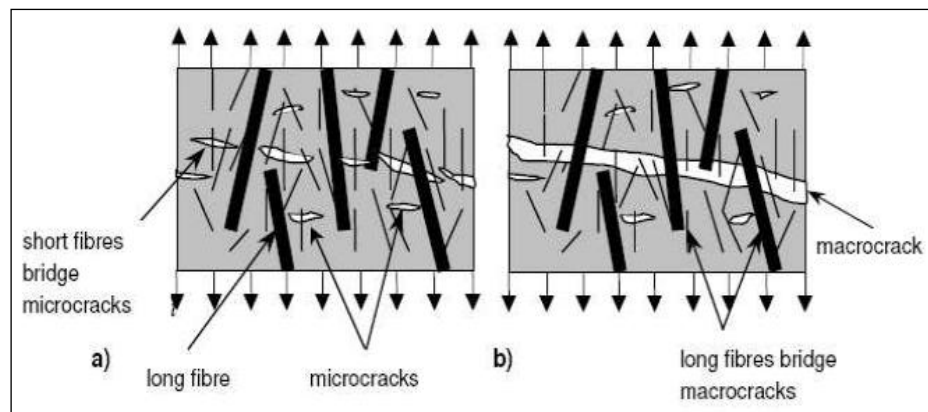


Figure 1.25. Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures (Kawamata *et al*, 03).

10.8. Utilisation des fibres dans la construction

Généralement, les fibres sont très utilisées dans les constructions afin d'améliorer leurs propriétés physico-mécaniques. L'utilisation des fibres végétales dans le renforcement des bétons est récente mais actuellement, ces fibres sont de plus en plus employées dans les dalles et pour le renforcement du plâtre (Khenfer, 90).

Ainsi, l'emploi des fibres synthétiques et métallique est très pratiqué dans plusieurs domaines de construction et dans la réparation des ouvrages endommagés. Le tableau 1.7 présente quelques applications des fibres :

Tableau 1.7. Renforcements de fibres dans les produits cimentaires (Kriker, 05).

Type de fibre	Application
Verre	Panneaux préfabriqués, murs, tuyaux d'égout, toiture en voile.
Acier	Élément de toitures en béton, revêtement de chaussée, tuyaux en béton, piste d'atterrissage, réservoirs sous pression, travaux de restauration bâtiments.
Polypropylène	Pieux de fondation, pieux précontraints, panneaux de revêtement, élément flottant de débarquement, réparation des routes, tuyau sous marin, travaux de restauration bâtiments.
Amiante	Voiles, tuyau, panneaux matériaux d'isolation thermique, plaques de toitures plates et ondulées, revêtement des murs.
Carbone	Élément ondulé pour la construction des planchers, membrane simple ou double courbure, coques.
Végétale	Dalles, tuiles.

10.9. Orientation préférentielle des fibres

Certains travaux ont été réalisés pour expliquer l'effet de l'orientation des fibres sur les propriétés mécaniques du béton. Casanova (Casanova, 96) a orienté les fibres d'une façon

verticale après avoir réalisé une éprouvette en béton, ensuite cette éprouvette est carottée dans trois directions différentes. Puis, il a réalisé des essais de traction par flexion 3 points afin d'étudier l'effet de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1.26.

Si les fibres sont orientées de façon perpendiculaire par rapport à l'axe de la fissure (orientation transversale), les fibres peuvent jouer un rôle de couture des fissures ce qui se traduit par l'augmentation de la résistance mécanique des bétons. Par contre, si les fibres sont orientées de façon parallèle par rapport à l'axe de la fissure, il y a une très faible quantité de fibres pour coudrer les fissures, on remarque alors des fissurations identiques à celui d'un béton qui n'est pas renforcé de fibres.

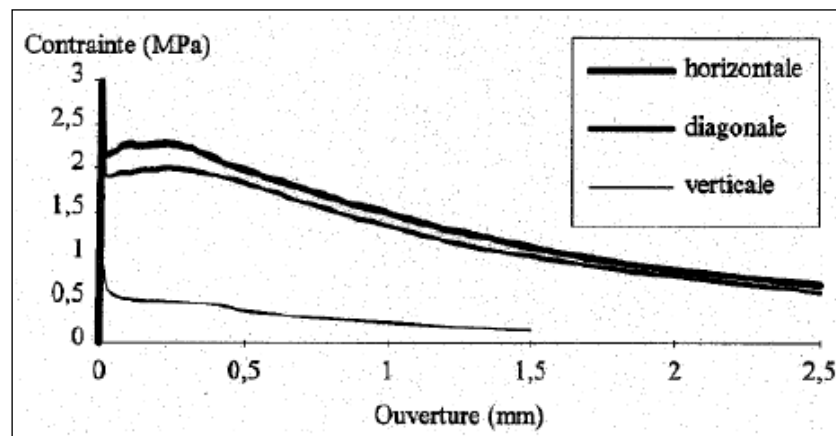


Figure 1.26. Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion (Casanova, 96).

Les fibres peuvent aussi coudrer les fissures lorsqu'elles sont orientées de façon diagonale ou incliné, ce qui permet d'obtenir un comportement post fissuration remarquable mais il reste moins intéressant que celui des fibres orientées horizontalement.

Pour avoir une orientation optimale des fibres, il est nécessaire de respecter quelques étapes pendant le malaxage et le coulage du béton afin de bien les disperser dans le mélange. Il existe aussi une autre méthode qui consiste à remplacer les bétons ordinaires par des bétons autoplaçants pour éliminer la vibration et il faut éviter aussi de faire des distances importantes pendant le coulage du béton.

11. BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS

Les fibres ont donné des résultats remarquables surtout au niveau des caractéristiques mécaniques des bétons, mais leur introduction dans le mélange peut entraîner des pertes d'ouvrabilité et une mauvaise répartition des fibres. Ces problèmes peuvent être évités dans les bétons autoplaçants. En effet, ce nouveau béton est caractérisé par une bonne fluidité ce qui facilite son écoulement sous l'effet de son propre poids. Ce type de béton ne nécessite pas une vibration ce qui entraîne une distribution homogène des fibres dans le mélange.

Le renforcement des bétons autoplaçants par des fibres reste peu utilisé, certains chercheurs ont expliqué que ce renforcement peut aider à réaliser des poutres en béton précontraint, dans des zones d'architecture très ferrillées pour limiter la fissuration. L'introduction des fibres influe premièrement sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais (rhéologie et ouvrabilité). Groth (Groth, 00), a montré que le dosage en fibre, sa nature et sa géométrie influent sur les l'ouvrabilité des bétons.

Ces caractéristiques ont été étudiées par plusieurs tests à l'état frais, comme l'essai d'étalement au cône d'Abrams.

11.1. Influence des fibres sur les propriétés des BAP à l'état frais

Grunewald et Walraven (Grunewald et Walraven, 01) ont effectué un plan expérimental pour étudier l'influence du dosage et de la géométrie de la fibre métallique ou polypropylène sur les caractéristiques d'un BAP à l'état frais. Après plusieurs tests d'ouvrabilité effectués sur quelques formulations des BAP à l'état frais, les résultats ci-dessous montrent l'effet des fibres.

- **Effet sur l'étalement**

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage de fibres entraîne la diminution de l'étalement. En observant la figure 1.27-a, on peut remarquer une ovalisation de la galette concernant les BAP renforcées par des fibres métalliques qui présentent une surface spécifique élevée (Dramix 80/30 PB), donc ces fibres gênent l'étalement du béton dans plusieurs directions. De plus, quelques formulations (figure 1.27-b) renforcées par des fibres plus longues (Dramix 80/60 BN), présentent une ségrégation (accumulation des fibres et des granulats au milieu).

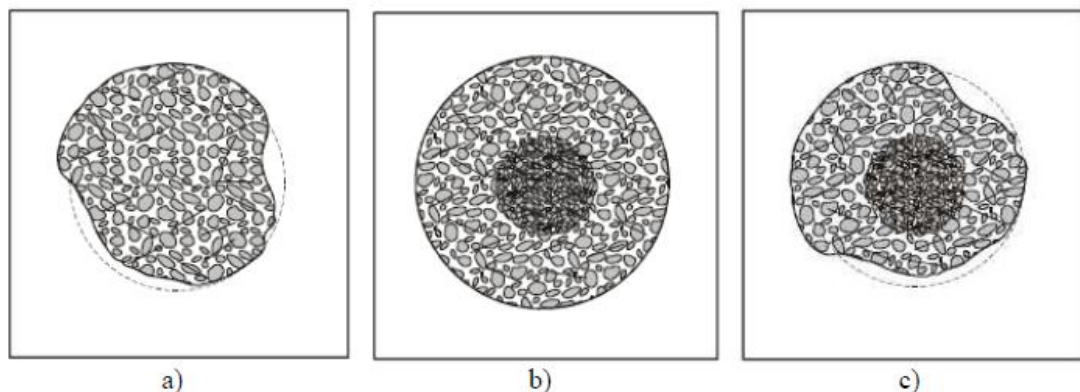


Figure 1.27. Effets des fibres sur l'étalement des BAP (Grunewald et Walraven, 01).

La Figure 1.27-c présente une situation plus grave qui se caractérise par une ovalisation et un amoncellement des fibres et des gros granulats au centre de la galette (Dramix 65/40 BN), (Grunewald et Walraven, 01).

L'ouvrabilité des bétons est influencée par plusieurs facteurs comme le taux de fibres et l'élanement (L_f/D_f), Grunewald *et al* (Grunewald et Walraven, 01) ont étudié l'effet du

facteur fibre (le produit entre l'élanement L_f/D_f et le taux volumique de fibres V_f) sur les propriétés des BAP à l'état frais. La figure 1.28 montre que l'augmentation du facteur fibre provoque une diminution notable de l'étalement.

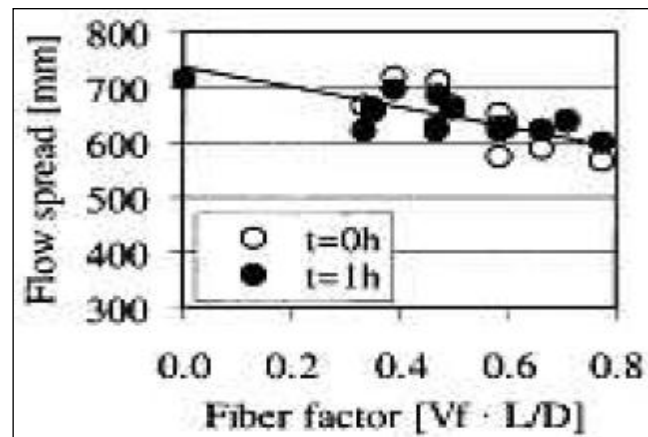


Figure 1.28. L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre (Grünwald et Walraven, 01).

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

Grünwald et Walraven (Grünwald et Walraven, 01) ont remarqué que la porosité interne du béton est importante si le taux de fibres est élevé ce qui entraîne l'augmentation de la viscosité plastique, donc l'écoulement du béton est gêné. La viscosité plastique est légèrement augmentée lorsque le taux volumique des fibres métalliques est de 1 %. Mais Au-delà de cette valeur, la viscosité devient plus importante ce qui empêche définitivement l'écoulement du béton. En plus, l'introduction des fibres plus longues entraîne une grande augmentation de la viscosité du béton.

11.2. Orientation et distribution des fibres

Les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des BAP sont affectées par l'orientation des fibres. Petersson (Petersson, 98) a effectué une recherche sur la boîte en L en suivant la distribution des fibres métalliques grâce à des photographies aux rayons X des échantillons en béton durci sciés horizontalement. Les résultats obtenus ont montré que les fibres sont bien réparties. En plus, la plupart des fibres étaient orientées dans le sens de coulage.

Groth et Nemegeer (Groth et Nemegeer, 99) ont noté aussi que les fibres suivent le sens de coulage. Même si l'écoulement du béton favorise l'orientation des fibres, les mêmes auteurs ont constaté que pour un dosage en fibres habituel, le béton ordinaire ou le BAP ont le même effet de renforcement surtout lorsqu'ils possèdent une classe de résistance identique. Ces résultats ont été tirés en s'appuyant principalement sur la résistance en flexion.

11.3. Comportement mécanique des BAP fibrés

La résistance à la traction, à la flexion et à la compression sont des caractéristiques mécaniques qui permettent de définir le comportement d'un béton autoplaçant durci. L'ouverture des fissures est influencée par les fibres, alors la rigidité et la ténacité d'un matériau dépendent du dosage et de la nature des fibres utilisées.

11.3.1. Comportement à la compression et à la traction

Alcantara (Alcantara, 04) a constaté que l'introduction des fibres influence légèrement la résistance à la compression des BAP. La résistance à court terme est assez faible, peut-être à cause d'un effet de retard de l'hydratation de la composition ou l'addition en contact avec l'adjuvant. Toutefois, à longue échéance et pour un même rapport E/L, la résistance en compression est semblable à celle d'un béton vibré.

Après 28 jours, la résistance mécanique en compression a été prise pour plusieurs types de bétons, avec une faible réduction des rapports R_c/R_t entre 7 et 28 jours. Cette diminution est vraisemblablement due à l'amélioration de l'adhérence entre la fibre et la matrice cimentaire à long terme. Ce mécanisme favorise l'amélioration de la résistance à la traction par flexion.

11.3.2. Comportement à la flexion

L'augmentation du dosage en fibres permet d'augmenter la rigidité du matériau et d'améliorer les performances des BAP en flexion (Groth et Nemegeer, 99).

Alcantara (Alcantara, 04) a étudié l'effet de deux types de fibres (métalliques FM et polypropylène FS) sur la résistance en flexion des BAP. Les résultats ci-dessous précisent l'influence de ces deux fibres :

- Les fibres métalliques (FM) qui offrent une bonne adhérence avec la matrice cimentaire ont permis d'améliorer la capacité portante du béton mais la résistance mécanique diminue rapidement pour des flèches plus élevées.
- Les fibres synthétiques (FS) n'ont pas présenté une capacité portante intéressante, cependant elles contribuent à maintenir une résistance mécanique post-pic stable même avec des ouvertures des fissures plus importantes.
- L'utilisation des fibres hybrides (métallique et polypropylène) permet d'augmenter la résistance à la flexion des bétons et de maintenir la capacité portante des constructions jusqu'aux ouvertures des fissures larges.
- Les BAP présentent une meilleure adhérence fibre-matrice par rapport à celle de béton ordinaire, avec n'importe quelle fibre (synthétique ou métallique).

La figure 1.29 montre la différence des comportements des BAP fibrés en flexion.

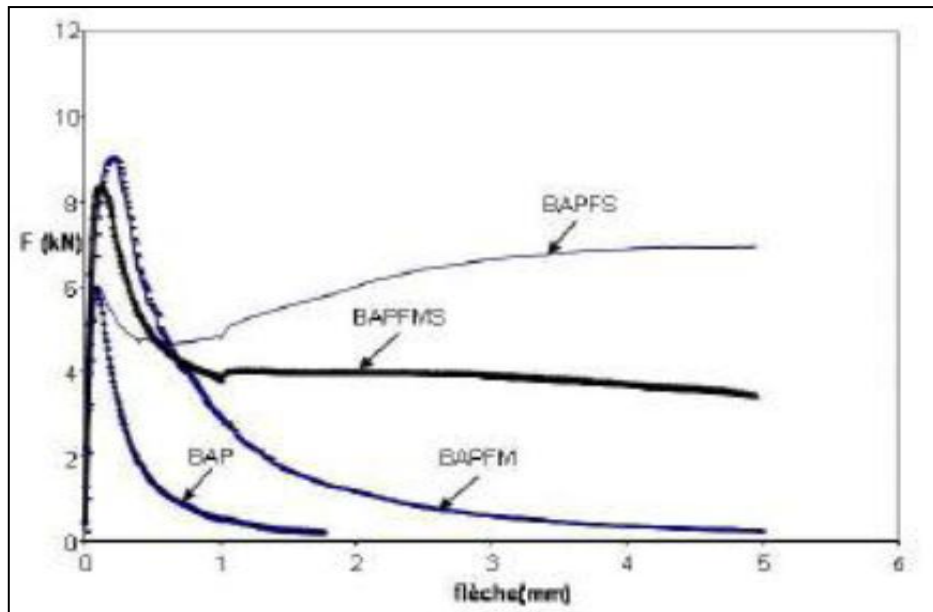


Figure 1.29. Courbe force-flèche pour différentes compositions (Alcantara, 04).

Kawamata *et al* (Kawamata *et al*, 00) ont expliqué que l'augmentation du taux de fibres métalliques entraîne une amélioration de la résistance mécanique en flexion. Dans ce travail, les chercheurs ont ajouté des fibres métalliques avec des longueurs différentes 8, 16, 24 et 32 mm et un taux volumique optimal en fibres égale à 1%.

12. CONCLUSION

L'étude du premier chapitre nous a permis de rassembler les principaux travaux disponibles réalisés sur le thème du fibrage des bétons autoplaçants.

Le premier enseignement que nous pouvons tirer est l'absence de travaux mettant en valeur les fibres végétales dans les bétons autoplaçants. Ce qui montre d'une part l'originalité du travail et d'autre part la difficulté de conduire un travail de recherche avec peu de repères. Cet état de fait ne nous a pas pour autant découragés mais au contraire nous a incités à exploiter tous les travaux qui présentent un intérêt certain pour notre travail.

Le béton autoplaçant (BAP) est très utilisé en Europe et se développe maintenant en Afrique pour remplacer le béton ordinaire dans la réalisation de plusieurs types d'ouvrages.

Les bétons autoplaçants sont des bétons extrêmement fluides et se mettent en place sans vibration. La capacité d'écoulement et la résistance à la ségrégation statique ou dynamique représentent les principales caractéristiques d'un BAP à l'état frais. Or l'introduction des fibres de nature végétale pourrait rapidement compromettre les principaux avantages des BAP par la réduction de l'ouvrabilité et l'augmentation des risques de ségrégation et de ressuage.

Le BAP présente certes un certain nombre d'avantages surtout à l'état frais, par contre, nous ne disposons que de peu de connaissances sur leur comportement à l'état frais et durci en

particulier lorsqu'ils sont fibrés. Le développement de ces bétons est gêné par une formulation complexe et des propriétés physico-chimiques mal connus (retrait et durabilité).

La plupart des travaux mettent en évidence l'intérêt d'introduire les fibres dans les bétons qui permet d'améliorer leur comportement à l'état durci, notamment par rapport au retrait et à la propagation de la fissuration.

Le but de notre travail est d'étudier le comportement du BAP en utilisant des sous-produits industriels et des matériaux locaux.

La deuxième étape consiste en l'introduction des fibres pour étudier les propriétés des BAP à l'état frais et durci.

Dans le cadre de ce travail de recherche, on a choisi d'utiliser des fibres synthétiques comme fibres témoins et des fibres naturelles d'origine végétale comme fibres d'étude.

A cet effet, le deuxième chapitre sera consacré à la caractérisation des matériaux et aux méthodes expérimentales.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Sommaire

1. INTRODUCTION	46
2. MATÉRIAUX UTILISÉS	46
2.1. Ciment.....	46
2.2. Granulats.....	48
2.3. Additions minérales.....	49
2.3.1. Filler calcaire.....	49
2.3.2. Laitier cristallisé.....	50
2.4. Adjuvant.....	52
2.5. Eau.....	52
2.6. Fibres.....	52
2.6.1. Fibres de polypropylène.....	52
2.6.2. Fibres de diss.....	53
2.6.2.1. Constituants hydrosolubles et organiques des fibres de diss.....	54
2.6.2.2. Traitement des fibres de diss.....	54
2.6.2.3. Microstructure et caractéristiques physico-mécaniques des fibres de diss.....	54
3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	56
3.1. Caractérisation microstructurale.....	56
3.3.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX).....	56
3.2. Caractérisation des BAP à l'état frais.....	57
3.2.1. Mobilité en milieu non confiné.....	57
3.2.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	57
3.2.1.2. Temps d'étalement T_{500}	58
3.2.1.3. Essai à la boîte LCPC.....	58
3.2.2. Mobilité en milieu confiné.....	59
3.2.2.1. Essai à la boîte en L.....	59
3.2.3. Stabilité.....	60
3.2.3.1. Essai de stabilité au tamis.....	60
3.2.4. Mesure de l'air occlus.....	61
3.3. Caractérisation des BAP à l'état durci.....	62
3.3.1. Confection et conservation des éprouvettes.....	62
3.3.2. Essais mécaniques.....	62
3.3.2.1. Essai de compression et de traction par flexion.....	62
3.3.2.2. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures.....	63
3.3.3. Vérification de l'absence de ségrégation.....	65
3.3.4. Essai de retrait empêché.....	65
3.3.5. Essais physico-chimiques.....	67

3.3.5.1. Absorption d'eau par capillarité.....	67
3.3.5.2. Essai de carbonatation accélérée.....	68
3.3.5.3. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	70

4. CONCLUSION	71
----------------------	-----------

Chapitre II

Caractérisation des matériaux et méthodes expérimentales

1. INTRODUCTION

Tous les constituants influent sur les propriétés des BAP à l'état frais surtout l'écoulement. Le rôle de chaque constituant dépend principalement de sa nature chimique et de son état. Pour cela, nous allons préciser dans cette partie les propriétés des différents constituants utilisés pour la formulation d'un béton autoplaçant (ciment, additions minérales, granulats, adjuvants et eau).

Le béton ordinaire est composé de ciment, d'eau et de granulats. Ce béton n'existerait pas s'il y a un manque d'un seul constituant. Cependant, Le béton autoplaçant est obtenu grâce à l'utilisation des additions minérales et d'adjuvant dans le mélange.

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés au béton pendant le malaxage avec un faible dosage pour améliorer les propriétés d'ouvrabilité du béton. On peut citer quelques types d'adjuvants qui peuvent changer le comportement des BAP (écoulement et rhéologie) : les plastifiants, les superplastifiants, les agents de viscosité, les entraîneurs d'air, les retardateurs et les accélérateurs de prises.

Dans ce chapitre, nous présenterons aussi les méthodes expérimentales qui permettent de caractériser les pâtes et les bétons en précisant la technique de malaxage, la mise en œuvre et le mode de conservation des éprouvettes.

L'étude des propriétés du BAP à l'état frais permet d'évaluer sa fluidité et sa résistance à la ségrégation (étalement au cône d'Abrams, la boîte en L et la stabilité au tamis). Puis, nous réaliserons des essais mécaniques et physico-chimiques à des échéances précises (résistance en compression, résistance en traction, absorption capillaire et porosité accessible à l'eau), cependant d'autres tests ont demandé un suivi au cours du temps (retrait empêché et carbonatation).

2. MATÉRIAUX UTILISÉS

2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est de type CEM II/A de classe 42.5, c'est un ciment portland composé, résultant d'un broyage simultané de clinker (70 à 80 %), de laitier granulé (15 à 25 %) et de gypse (5 %), conforme à la norme algérienne NA 442 (NA 442, 05) et provenant de la cimenterie de Hdjar Essoud.

La composition chimique et minéralogique du ciment sont données dans les tableaux 2.1 et 2.2.

Tableau 2.1. Compositions chimiques du ciment.

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PAF	CaO, libre
en %	60,24	5,69	23,25	3,36	0,74	0,27	0,45	1,94	1,67	0,98

Tableau 2.2. Compositions minéralogiques du clinker.

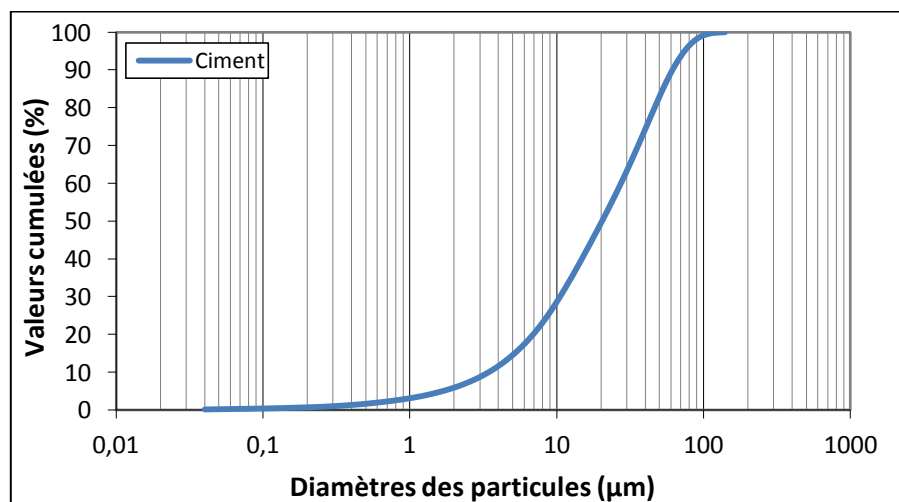
Minéraux	C3S	C2S	C3A	C4AF
%	59,66	16,45	9,14	11,02

Les caractéristiques physiques et mécaniques du ciment sont présentées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment employé.

Désignations	valeurs	Unités
Densité apparente	1013	(kg/m ³)
Densité absolue	3060	(kg/m ³)
Refus au tamis 100 μ	1,71	(%)
Surface Spécifique Blaine	3726	(cm ² /g)
Consistance normale	28	(%)
Début de prise	2h 37min	h/min
Fin de prise	4h 09min	h/min
Résistance à 28 jours :		MPa
Compression	36	
Traction par flexion	7	

La figure 2.1 présente la courbe granulométrique du ciment utilisé, obtenue par granulométrie laser en dispersion par voie humide (LMDC – Toulouse).

**Figure 2.1.** Courbe granulométrique du ciment

2.2. Granulats

Les deux sables utilisés dans cette étude sont de deux natures différentes, le premier est un sable roulé, provenant de la région de Tébessa, siliceux et fin, caractérisé par un module de finesse de 1,65. Le deuxième est un sable concassé, de roche calcaire plus gros que le sable de dune qui provient de la localité d'Aïn Abid-Constantine, de module de finesse de 3,74 venant ainsi corriger la granulométrie du sable fin.

Le gravillon et le gravier utilisés dans cette étude sont des granulats concassés, provenant de la même carrière située dans la région d'Annaba. La nature minéralogique de ces granulats est semblable à celle du sable concassé et présentant une granulométrie continue (figure 2.2).

Les courbes granulométriques (figure 2.2) montrent que la granulométrie des graviers est serrée. Par contre la granulométrie des deux sables est plus étendue puisque ces derniers contiennent de fines particules de taille $< 63\mu\text{m}$.

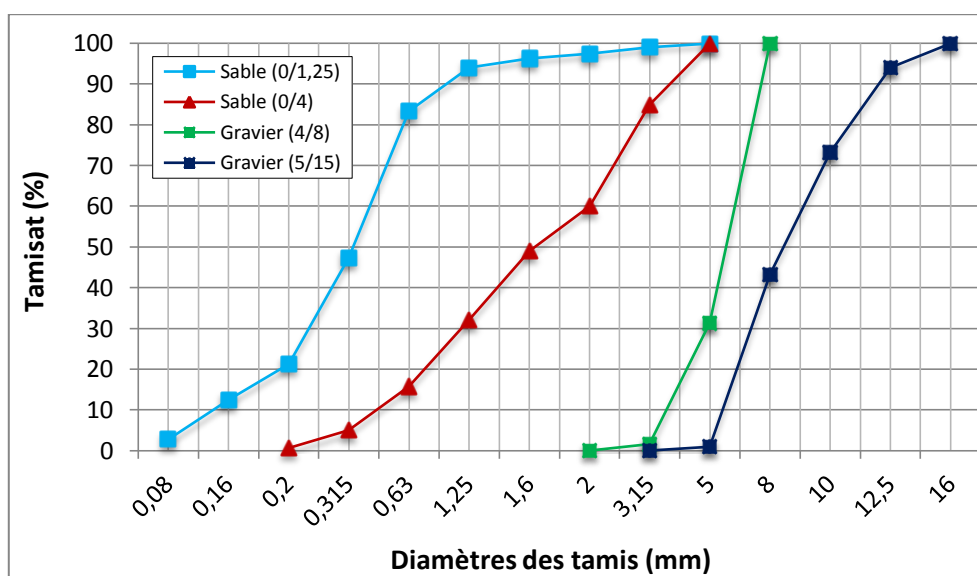


Figure 2.2. Courbes granulométriques des granulats

Les principales caractéristiques des granulats sont données dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Caractéristique des granulats.

Caractéristiques	Unité	Sable roulé	Concassé		
			Sable	Gravillon	Gravier
- Masse volumique apparente	kg /m ³	1358	1425	1390	1370
- Masse volumique absolue	kg /m ³	2540	2520	2500	2500
- d/D	-	0/1,25	0/4	4/8	5/15
- Module de finesse	-	1,65	3,74	-	-
- Équivalent de sable	%	86	89	-	-
- Coefficient d'absorption	%	-	-	1.4	1.4
- Los Angeles	%	-	-	-	28

2.3. Additions minérales

Deux additions de nature minéralogique différente ont été utilisées dans ce travail : le filler calcaire et le laitier cristallisé.

2.3.1. Filler calcaire

Les fillers calcaires (FC) sont de même nature minéralogique que le sable concassé, ils sont composés essentiellement de calcite (> 70 %). Ces fillers sont finement broyés obtenus après le tamisage du sable concassé à travers un tamis de 80 μ m (figure 2.3).



Figure 2.3. Filler calcaire

Les caractéristiques chimiques et physiques des fillers calcaires sont données dans les tableaux 2.5 et 2.6.

Tableau 2.5. Caractéristiques chimiques des fillers calcaires

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Cl	SO ₃	PAF	K ₂ O
en %	55,51	0,11	0,50	0,06	0,20	0,08	0,027	0,06	42,5	0,01

Tableau 2.6. Caractéristiques physiques des fillers calcaires.

Désignations	valeurs	Unités
- Densité apparente	858	(kg/m ³)
- Densité absolue	2740	(kg/m ³)
- Refus au tamis 40 μ	23,28	(%)
- SSB	9918	(cm ² /g)
- Consistance normale	23	(%)

Le diagramme (DRX) présenté à la figure 2.4 montre que le filler calcaire est essentiellement composé de minéral cristallisé, sous la forme de calcite (CaCO₃).

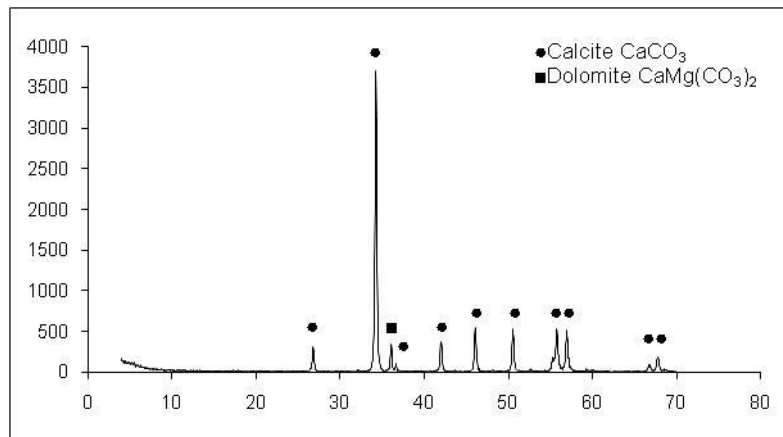


Figure 2.4. DRX du filler calcaire (LMDC – Toulouse)

2.3.2. Laitier cristallisé

Le laitier cristallisé (LC) est un sous produit de l'élaboration de la fonte, déversé dans des fosses à sa sortie du haut fourneau, refroidit à l'air libre et se présente sous forme de granulat de 0 à 20 mm après concassage. Le laitier cristallisé d'El Hadjar a une couleur grise et une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique lorsqu'il existe, n'est que modeste. Il est utilisé sous forme d'une poudre finement broyée obtenue par un concassage à l'aide d'un concasseur à mâchoires, suivit d'un broyage dans un broyeur à boulets afin d'obtenir une finesse inférieure à 80µm (figure 2.5).



Figure 2.5. Laitier cristallisé.

Les caractéristiques chimiques et physiques du laitier cristallisé sont présentées dans les tableaux 2.7 et 2.8.

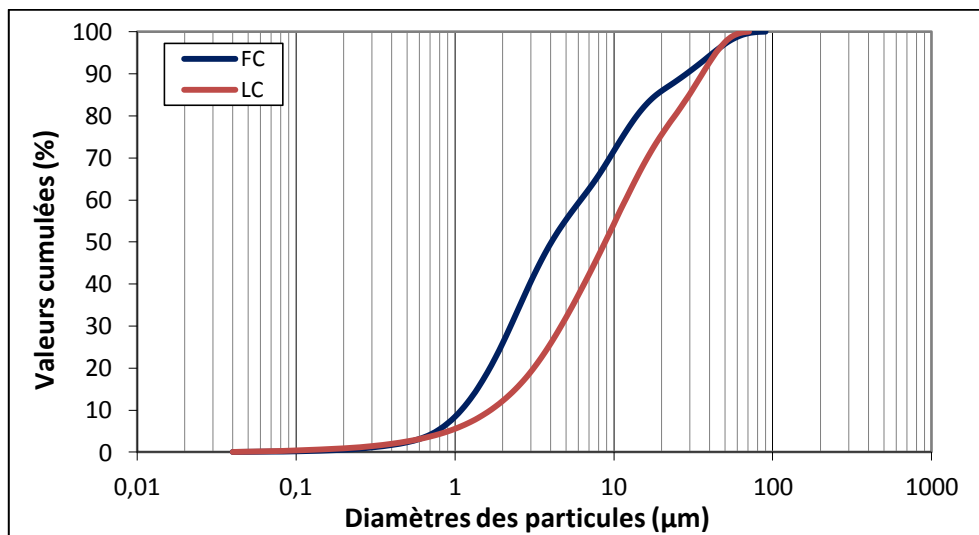
Tableau 2.7. Caractéristiques chimiques du laitier cristallisé

Oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
en %	38,55	8,45	35,73	3,20	5,21	0,36	0,95	0,34

Tableau 2.8. Caractéristiques physiques du laitier cristallisé

Désignations	valeurs	Unités
- Densité apparente	1224	kg/m ³
- Densité absolue	3030	Kg/m ³
- Refus au tamis 40μ	17,40	%
- Surface spécifique Blaine	6016	cm ² /g
- Consistance normale	24,5	%

La figure 2.6 présente les courbes granulométriques des additions, obtenue par granulométrie laser, en dispersion par voie humide (LMDC – Toulouse).

**Figure 2.6.** Courbes granulométriques des additions

D'après la figure 2.6, on constate que le filler calcaire présente des grains plus fins et une surface blaine supérieure à celle du laitier cristallisé.

Le diagramme DRX du laitier cristallisé présenté par la figure 2.7, montre l'existence d'une phase vitreuse. Le refroidissement lent du laitier ne peut être uniforme dans toute la masse, les couches au contact de l'air refroidissent plus rapidement et constitue la partie vitreuse du laitier cristallisé.

Les principaux minéraux mis en évidence par DRX sont la Mélilite qui est une solution solide de Gehlinites (C_2AS) et d'Akermanite (C_2MS_2), la Merwinite (C_3MS_2) et le silicate bicalcique (C_2S).

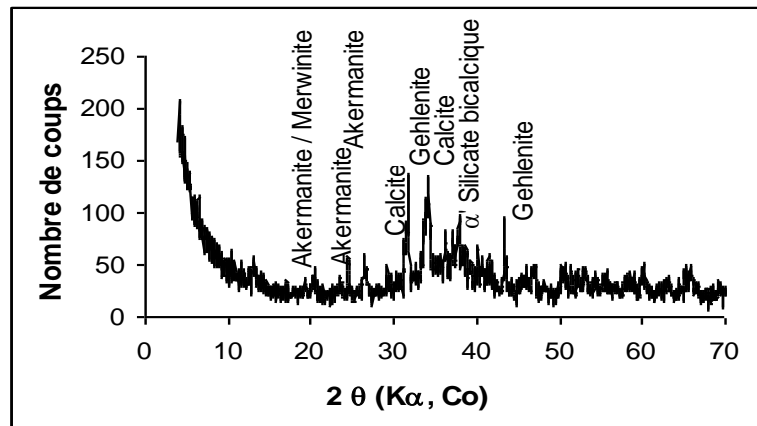


Figure 2.7. DRX du laitier cristallisé (LMDC – Toulouse)

2.4. Adjuvant

L'adjuvant employé est un plastifiant - réducteur d'eau (Viscocrete 3045) à base de polycarboxylates modifiés, de masse volumique 1110 kg/m^3 , le $\text{pH} = 5 \pm 1$, la teneur en ions chlore $\leq 0,1 \%$, la teneur en $\text{Na}_2\text{O Eq} \leq 2,5 \%$, l'extrait sec = $36,4 \pm 1,8 (\%)$. La plage d'utilisation recommandée varie de 0,25 à 2,5 % du poids du ciment.

2.5. Eau

L'eau utilisée pour le gâchage des BAP est l'eau potable du robinet, elle ne doit pas présenter une grande quantité d'impuretés qui peuvent dégrader les propriétés des bétons. Une partie de l'eau ajoutée au mélange est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une autre partie est consommée par l'hydratation et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton, elle est responsable de la fluidité du béton (NF EN 1008, 03).

En plus de l'hydratation du ciment, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. Mais, un excès d'eau peut entraîner des problèmes de ségrégation du béton frais et la diminution de la résistance mécanique.

2.6. Fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont de deux natures, synthétique de polypropylène et végétale de diss.

2.6.1. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène (PP) courtes sont fournies par la société Granitex. Ces fibres sont ajoutées au béton et au mortier (figure 2.8).

Ce matériau a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où il apporte les avantages suivants :

- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs.
- Augmentation notable de la résistance aux chocs.

- Limite l'ouverture des fissures.



Figure 2.8. Fibres de polypropylène

Les principales caractéristiques de ces fibres sont données dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9. Caractéristiques des fibres de polypropylène selon le fabricant (Annexe B)

Désignations	Valeurs	Unités
- Longueur	12	mm
- Section transversale	30	μm^2
- Densité	0,9	g/cm^3
- Module d'élasticité	3500	MPa
- Résistance chimique aux sels et acides	Haute	-
- Point de fusion	150	$^{\circ}\text{C}$
- Allongement à la rupture	50	%

2.6.2. Fibres de Diss

Le diss est une graminée répandue à l'état sauvage dans plusieurs régions de l'Algérie (figure. 2.9).



Figure 2.9. Plante de diss
(El Kala, Algérie)



Figure 2.10. Tige de diss

Localement appelé « diss », son nom scientifique est **l'ampélodesmos mauritanicus**. Cette plante était utilisée dans la réalisation d'habitats ruraux anciens en terre armée de diss,

pour son abondance mais aussi en raison de ses qualités mécaniques. Le contour de la fibre de diss n'est pas lisse comme celui de la fibre de polypropylène. Il présente des aspérités ainsi qu'une remarquable rugosité. Cependant, comme toutes les autres fibres végétales, La fibre de diss présente aussi une absorption d'eau très importante en raison de sa structure poreuse et largue des substances ayant pour effet de retarder la prise du ciment (Merzoud *et al*, 08).

2.6.2.1. Constituants hydrosolubles et organiques des fibres de diss

L'analyse chimique a permis de déterminer le pourcentage de sucre dans la fibre de diss bouillie et non bouillie (Merzoud *et al*, 08 ; Sellami, 15), ensuite le traitement thermique effectué sur la fibre de diss a permis d'extraire les matières hydrosolubles dans l'eau bouillante (tableau 2.10).

Tableau 2.10. Pourcentages des matières hydrosolubles et organiques des fibres de diss

Types de fibres	% des matières hydrosolubles	% de sucre
Fibre de diss non bouillies	17	62
Fibre de diss bouillies	5	0

2.6.2.2. Traitement des fibres de diss

Les études qui ont été conduites sur les fibres de diss (Merzoud *et al*, 08 ; Sellami, 15) montrent en effet qu'il est nécessaire de les traiter avant leur utilisation dans le béton, permettant d'éliminer des substances organiques ayant pour effet de retarder la prise et le durcissement du ciment et de provoquer une mauvaise liaison entre la fibre et la matrice cimentaire. Ce traitement n'affecte pas la surface de la fibre, il consiste à broyer et à faire bouillir les fibres de diss dans l'eau pendant trois heures. Elles sont ensuite rincées et séchées avant leur utilisation (Merzoud *et al*, 08).

Ceci a pu être vérifié par les essais de prise sur la pâte de ciment en utilisant l'eau distillée, l'eau du robinet et l'eau d'extraction par ébullition (tableau 2.11).

Il apparaît clairement un retard considérable de début de prise dans le cas de l'utilisation de l'eau d'extraction par ébullition.

Tableau 2.11. Essais de prise sur différents mélanges

Mélanges	Début de prise	Fin de prise
Ciment + eau distillée	2h23min	5h10min
Ciment + eau du robinet	2h38min	5h40min
Ciment + eau d'extraction du diss bouilli	3h26min	7h00min

2.6.2.3. Microstructure et caractéristiques physico-mécaniques des fibres de diss

L'observation de la fibre de diss (figure 2.11) au MEB, montre que son contour n'est pas lisse comme celui des fibres polypropylène, mais présente des aspérités ainsi qu'une

remarquable rugosité et on peut noter aussi que la surface du diss (figure 2.12) contient des épines qui jouent un rôle très important, pouvant améliorer l'adhérence à la matrice cimentaire. Il faut signaler que ces fibres garantissent les meilleurs résultats de point de vue de résistance à la traction (Merzoud *et al*, 08), c'est pour cette raison que notre choix s'est porté sur ces fibres.



Figure 2.11. Fibre de diss après concassage et découpage

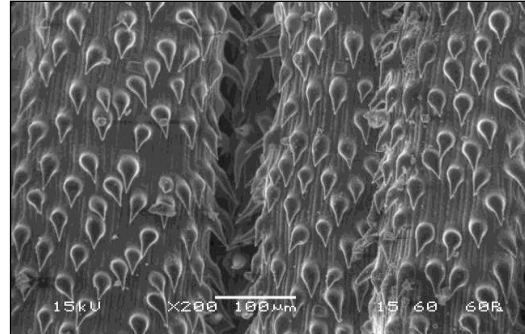


Figure 2.12. Mise en évidence des épines des fibres de diss (LMDC - Toulouse)

Un essai de traction directe réalisé sur des échantillons de fibre de diss de longueur 150 mm, de largeur 8 mm et de 0,2 mm d'épaisseur a permis de mettre en évidence une résistance en traction de 100 MPa, ce qui est une performance intéressante pour une fibre d'origine végétale (figure 2.13).



Figure 2.13. Essai de traction directe sur la fibre de diss
(Laboratoire de Génie Civil - Annaba)

La figure 2.14 montre le comportement de la fibre en traction directe. La courbe (contrainte – déformation) classique de traction traduit plutôt un comportement fragile. La loi de comportement est linéaire.

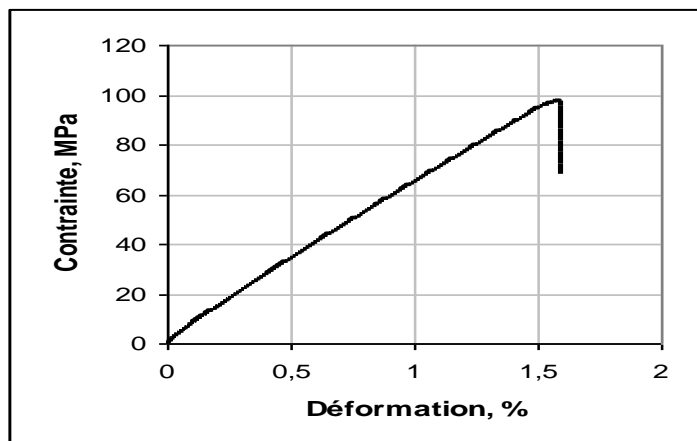


Figure 2.14. Courbe contrainte - déformation de la fibre de diss

Les principales propriétés physiques et mécaniques de ces fibres sont données au tableau 2.12.

Tableau 2.12. Caractéristiques des fibres de diss

Désignation	Valeurs	Unités
- Longueur	12	mm
- Largeur	1 à 1,2	mm
- Épaisseur	0,2 à 0,4	mm
- Densité	1,23	g/cm ³
- Résistance à la traction	100	MPa
- Module d'élasticité	6690	MPa
- Absorption d'eau après 24h		
✓ Non traitée (à l'état brut)	88	%
✓ Traitée à l'eau bouillante	82	%

3. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

3.1. Caractérisation microstructurale

3.3.1. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode qui consiste à identifier les phases cristallines d'un matériau. L'analyse par diffraction des différents échantillons a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre de type siemens D5000 équipé d'un monochromateur arrière SOLLER et d'une anticathode au cobalt Co.K α ($\lambda = 1,789 \text{ \AA}$). Toutes les analyses ont été réalisées sur une plage de 10 à 70° (2θ Co. K α), avec un pas d'avancement de $0,02^\circ$ et un temps de comptage de 12 secondes, sur des échantillons préalablement broyés à l'aide d'un broyeur (LMDC – Toulouse).

3.2. Caractérisation des BAP à l'état frais

Le béton autoplaçant doit être très fluide sans présenter des signes de ségrégation ou de ressuage, alors il doit être homogène et sans pour autant entraîner une diminution des performances mécaniques.

A Cet effet, les bétons autoplaçants formulés doivent satisfaire plusieurs tests, dont nous avons choisi trois tests normalisés (NF EN 12350 – 8, 10 ; NF EN 12350 – 10, 10 ; NF EN 12350 – 11, 10) permettant de caractériser leurs principales propriétés à l'état frais : l'essai d'étalement au cône d'Abrams (SF) et le temps d'étalement pour atteindre un diamètre de 500 mm (T_{500}) selon la norme (NF EN 12350 – 8, 10), l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L (PL) selon la norme (NF EN 12350 – 10, 10) et l'essai de stabilité au tamis selon la norme (NF EN 12350 – 11, 10). Les valeurs recommandées par la norme (NF EN 206 – 9, 10) sont données dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13. Valeurs recommandées par les normes (EN 206 – 9, 10)

Essais	Classes	
	Etalement (SF), cm	SF 1
SF 2		65 - 75
SF 3		75 - 85
Stabilité au tamis (SR), %	SR 1	≤ 20
	SR 2	≤ 15
Boîte en L , PL = (H_2 / H_1)	PL 1	$\geq 0,8$
	PL 2	$\geq 0,8$
T_{500} , Secondes	VS 1	< 2
	VS 2	≥ 2

3.2.1. Mobilité en milieu non confiné

3.2.1.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams

Le cône d'Abrams est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton. Le cône est ensuite soulevé verticalement et le béton sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, ensuite on mesure l'étalement qui correspond à la moyenne des deux diamètres perpendiculaires de la galette de béton. À l'arrêt de l'écoulement, les gros granulats devraient être répartis d'une façon homogène sans présenter une concentration au milieu de la galette (Figure 2.15).

La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 550 et 850 mm (NF EN 12350 – 8, 10).



Figure 2.15. Etalement d'un BAP homogène et fluide



Figure 2.16. Etalement d'un BAP sans ressuage

3.2.1.2. Temps d'étalement T_{500}

L'essai d'étalement peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 500 mm (T_{500}), à partir du moment où on soulève le cône, pour que la galette de béton atteigne un diamètre de 500 mm. Pour un même étalement final, plus la pâte sera visqueuse, plus le béton mettra de temps à s'affaisser et plus la valeur T_{500} sera élevée. On s'attend donc à ce que cette valeur soit reliée à la viscosité du béton (Emborg, 99). Ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du mélange.

C'est grâce à cet essai qu'on pourrait mesurer la viscosité plastique (μ) selon le modèle de Sedran (Sedran, 99), en utilisant la formule suivante :

$$\mu = \frac{\rho}{1000} (0,0268SF - 2,39)T_{500} \quad (2.1)$$

μ : la viscosité plastique du matériau en (Pa.S).

ρ : la masse volumique du béton (Kg/m^3).

Sf : l'étalement en (mm).

T_{500} : le temps que met la galette à atteindre un diamètre de 500 mm (en seconde).

3.2.1.3. Essai à la boîte LCPC

La boîte LCPC, conçue par Roussel (Roussel, 07) permet d'établir une corrélation entre ouvrabilité et rhéologie à l'aide d'un canal de dimensions 150 x 200 x 1200 mm.

- **Mode opératoire de l'essai :**

- Remplir un seau humidifié muni d'un bec verseur de 6 litres de béton autoplaçant.
- Verser lentement le BAP à une des extrémités de la boîte (la vidange du seau devra prendre environ 30 secondes, figure 2.17).
- Attendre jusqu'à ce que le flux de l'écoulement cesse (environ 2 mn) et mesurer la longueur d'écoulement dans la boîte (Roussel, 07).



Figure 2.17. Essai à la boîte LCPC

Cet essai consiste à effectuer un écoulement d'un BAP dans un chenal et de caractériser sa mobilité dans ce milieu. Il permet de mesurer la longueur d'étalement à l'arrêt de l'écoulement. Alors le seuil de cisaillement (τ) du BAP est calculé grâce à un abaque (figure 2.18) qui relie la longueur d'étalement à un rapport seuil d'écoulement / densité (τ/ρ).

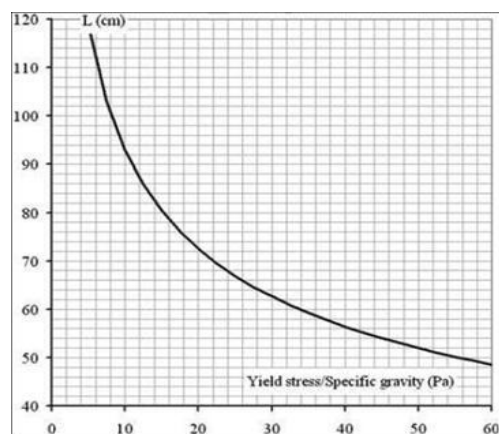


Figure 2.18. Relation entre longueur d'étalement et seuil découlement (Roussel, 07).

3.2.2. Mobilité en milieu confiné

L'écoulement du béton dans ce milieu est défini par son homogénéité. Pendant la mise en place, le mélange doit s'écouler et franchir des armatures plus ou moins denses. Après le remplissage, le béton est soumis à la pesanteur et doit rester homogène durant ces étapes. L'essai de la boîte en L est caractérisé par des armatures denses qui entraînent un obstacle pour l'écoulement du matériau.

3.2.2.1. Essai à la boîte en L

Cet essai permet d'étudier la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier l'absence des phénomènes de blocage pendant la mise en œuvre du béton. Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L. La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être ajoutées avant la trappe. Des normes (AFGC, 08 ; NF EN 12350 – 10, 10) recommandent l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm (Figure 2.19). Le mode opératoire de l'essai à la boîte L-box est le suivant :

La partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 litres). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, on mesure les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale (H_1 et H_2).



Figure 2.19. Essai à la boîte en L

Le rapport H_2 / H_1 permet de caractériser le taux de remplissage qui doit être supérieur ou égale à 0,8 (NF EN 12350 – 10, 10). Ce rapport renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

3.2.3. Stabilité

La ségrégation est néfaste pour la résistance mécanique et la durabilité des BAP. Mais, généralement elle n'est pas visible sur les parements sauf si elle est suivie d'un ressuage. On trouve deux types de ségrégation, selon la façon de la mise en place, la ségrégation dynamique apparaît dans le coffrage pendant le coulage et provoque une séparation entre les gros granulats et la pâte du béton, cependant la ségrégation statique se manifeste lorsque le matériau est en place et jusqu'à la prise.

3.2.3.1. Essai de stabilité au tamis

Ce test nous permet de caractériser la stabilité du béton autoplaçant et d'étudier sa résistance à la ségrégation statique (NF EN 12350 – 11, 10). Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser ($4,8 \pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis d'ouverture 5 mm avec une hauteur de chute de $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ et laissé 2 min, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis (figure 2.20). Le pourcentage de laitance (P) traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donc calculé :

$$SR = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formulations de béton autoplaçant de la façon suivante (NF EN 206 – 9, 10):

- SR1 : quantité de laitance ≤ 20 %.
- SR2 : quantité de laitance ≤ 15 %.



Figure 2.20. Essai de stabilité au tamis

3.2.4. Mesure de l'air occlus

La teneur en air au sein du béton frais est mesurée à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres de capacité (NF EN 12350-7, 12). Un pourcentage faible de la teneur en air occlus offre aux bétons des propriétés mécaniques remarquables.

Cet aéromètre est constitué d'une cuve recevant l'échantillon de béton et d'un couvercle rigide muni d'un cadrant gradué (figure 2.21).

L'ensemble couvercle-cuve est fixé par un mécanisme étanche et le tout est rempli d'eau. Une pression est ensuite appliquée sur l'échantillon en utilisant une pompe à air installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression entraîne une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. Ensuite la teneur en air totale en % est donnée par le manomètre.



Figure 2.21. Aéromètre à béton

3.3. Caractérisation des BAP à l'état durci

3.3.1. Confection et conservation des éprouvettes

Le malaxage des bétons a été réalisé à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 60 litres qui assure le mélange des constituants par simple rotation de la cuve, suivant un axe qui peut être horizontal ou légèrement penché. Le meilleur brassage des éléments est obtenu lorsque l'inclinaison de la cuve sur l'horizontale ne dépasse pas 15 à 20° environ.

Les pales collées à la paroi intérieure sont d'une grande importance, et leur disposition permet le bouleversement des constituants dans la cuve, donnant ainsi une bonne homogénéisation du mélange.

La séquence de malaxage des différents constituants est décrite comme suit :

- Les constituants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant : gravier, gravillon, une partie du ciment, le sable concassé, le sable roulé et enfin le reste de ciment.
- Puis malaxage à sec pendant 60 secondes.
- Introduction de 75 % d'eau et malaxage pendant 2 minutes.
- L'adjuvant est ajouté dans les 25 % d'eau restante, ensuite introduit dans la bétonnière.
- Puis malaxage pendant 3 minutes.
- La durée totale du malaxage est de 6 minutes.

Après avoir terminé les essais d'ouvrabilité, le béton est ensuite remis dans la cuve de la bétonnière pour un deuxième malaxage afin d'effectuer la mise en place dans les différents moules.

Les moules sont remplis de béton sans aucune vibration et conservés pendant 24 heures à la température ambiante. Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées sous l'eau à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'aux jours de l'écrasement.

3.3.2. Essais mécaniques

3.3.2.1. Essai de compression et de traction par flexion

Dans notre travail, la forme cubique des éprouvettes est la plus adaptée pour les essais de compression. Les moules sont en acier, lubrifiés à l'aide d'une huile synthétique (commun pour les véhicules et les engins) afin d'assurer un surfacage parfait sans collage aux parois du moule au moment de décoffrage. Pour chaque essai on utilise 3 éprouvettes.

Des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm ont été utilisées pour les essais de compression selon la norme (NF EN 12390-3, 12) à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN. Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'aux jours d'écrasement : 2, 7, 28 et 90 jours. Des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm ont servi pour mesurer la résistance en traction par flexion. Les éprouvettes sont

démoulées 24 heures après le coulage et conservées sous l'eau à la température ambiante et testées à 2 et 28 jours.

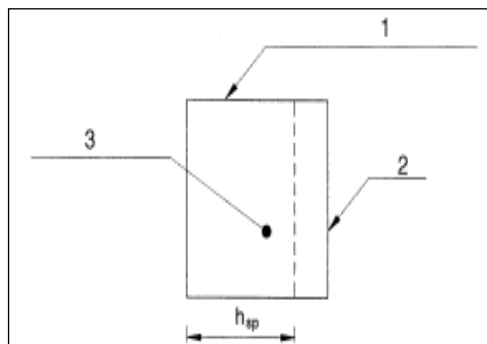
3.3.2.2. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures

Les éprouvettes doivent être des prismes conformes à la norme (NF EN 14651+A, 07) ayant une dimension nominale (largeur et hauteur) de 150 mm et une longueur L telle que $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$.

Pour ce test, nous avons utilisé des éprouvettes de dimension (15x15x55 cm) conservées dans une salle à 20 °c et 100% d'humidité relative durant 28 jours.

La forme et les dimensions spécifiées des éprouvettes conviennent pour du béton comportant des granulats de taille maximale 32 mm et des fibres métalliques de 60 mm de longueur maximale.

Un sciage par voie humide doit être utilisé pour entailler les éprouvettes. Ces dernières doivent être tournées de 90° autour de leur axe longitudinal puis sciées dans leur largeur à mi-portée (figure 2.22).



Légende

1. Surface supérieure pendant le moulage
2. Entaille
3. Section transversale de l'éprouvette

Figure 2.22. Position de l'entaille sciée dans l'éprouvette

La largeur de l'entaille x doit être inférieure ou égale à 5 mm, la distance h_{sp} doit être de 125 mm (figure 2.22 et 2.23).

Une fois sciées, les éprouvettes doivent être conservées pendant au moins 3 jours (NF EN 14651+A, 07). Les essais sont effectués après 28 jours de cure humide.

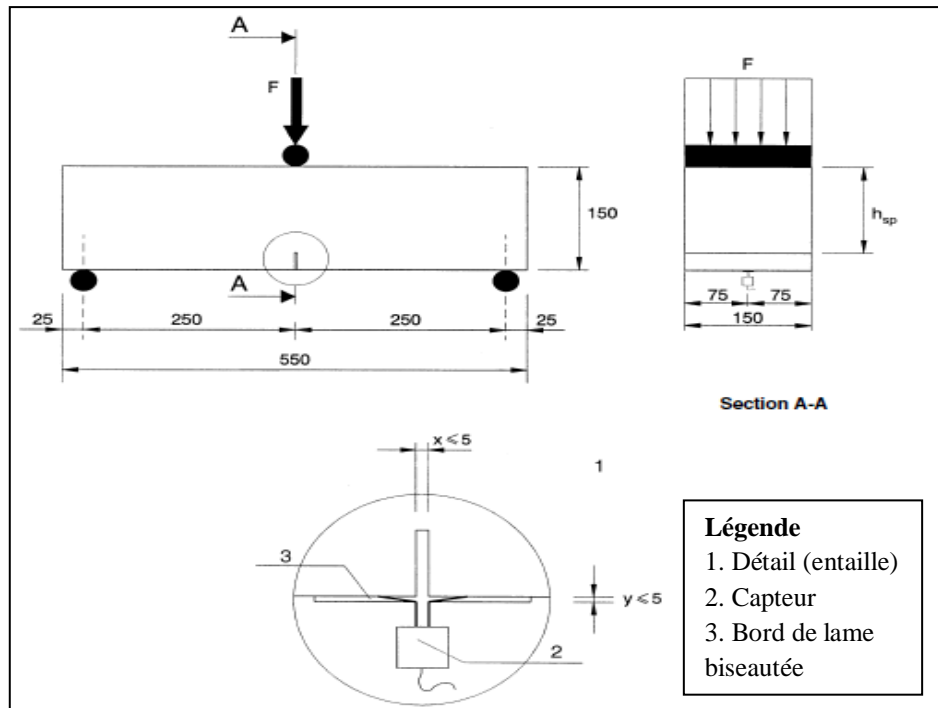


Figure 2.23. Configuration type pour le mesurage de CMOD

Lorsque le déplacement du bord de la fissure (ou de l'entaille) est mesuré, un capteur de déplacement doit être installé le long de l'axe longitudinal à mi-largeur de l'éprouvette, de manière que la distance y entre le bas de l'éprouvette et la ligne de mesure soit inférieure ou égale à 5 mm (figure 2.23).

La relation entre le CMOD et la flèche peut être approchée par la formule suivante :

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04 \quad (2.3)$$

δ : La flèche, en millimètres.

CMOD : Crack Mouth Opening Displacement (Déplacement du bord de la fissure), en millimètres (NF EN 14651+A, 07).

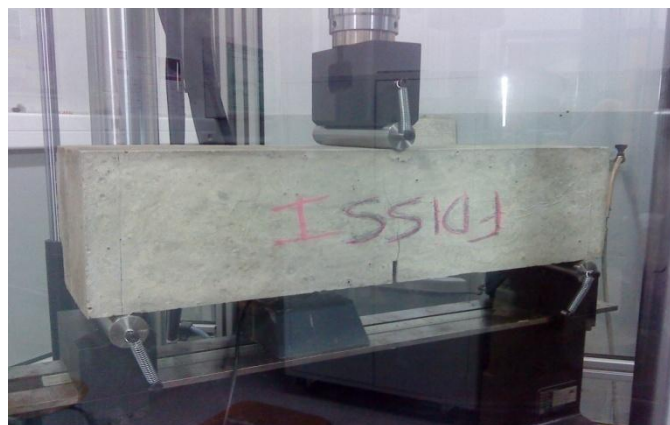


Figure 2.24. Mesure de l'ouverture des fissures

3.3.3. Vérification de l'absence de ségrégation

Un autre moyen de contrôler la ségrégation statique d'un BAP consiste à scier des éprouvettes cylindriques de dimensions 11x22 cm suivant le sens du coulage et à observer la répartition des granulats sur la hauteur de l'éprouvette sciée (figure 2.25).

Une bonne résistance à la ségrégation se traduit par une distribution régulière des gros granulats dans toutes les parties de l'élément et à tous les niveaux. En d'autres termes, le béton ne doit subir aucune forme de ségrégation horizontale et verticale.

La ségrégation horizontale est causée par l'écoulement du matériau sur des distances plus ou moins importantes. Elle est aussi amplifiée par les éventuels blocages des gros granulats au voisinage des mailles d'armatures (Bensebti, 08).

La ségrégation verticale, appelée aussi **ségrégation statique** est souvent causée par un tassement des gros granulats au fond du volume du béton due à une mauvaise formulation de la pâte (figure 2.25).

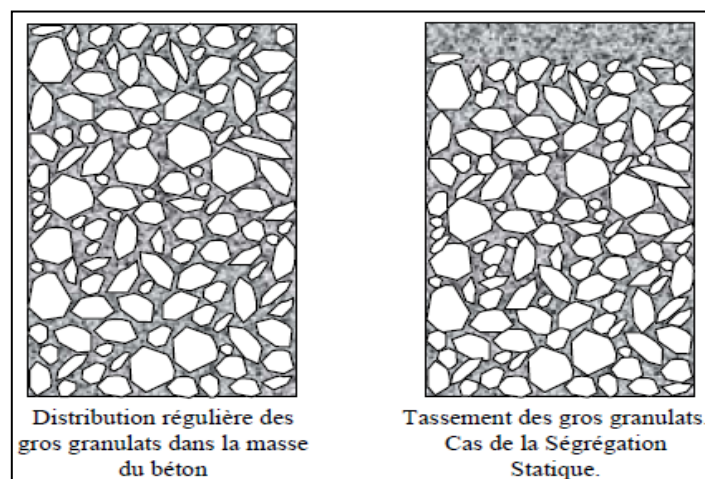


Figure 2.25. Exemple d'une ségrégation statique dans un volume de béton (Bensebti, 08)

3.3.4. Essai de retrait empêché

L'objectif de l'essai de retrait empêché est de suivre le développement de la contrainte de traction dans une éprouvette de béton coulé autour d'un cœur annulaire en acier rigide et ce jusqu'à la fissuration du matériau cimentaire (figure 2.26). L'anneau en acier a pour rôle de bloquer partiellement les variations dimensionnelles du matériau cimentaire ce qui en contre partie entraîne le développement des contraintes de traction et la fissuration (ASTM C, 05).

Les variations dimensionnelles de retrait du matériau cimentaire sont partiellement empêchées. En contrepartie, sous l'étreinte de béton, le cœur en acier se déforme. Le dispositif utilisé est conforme à la norme ASTM (ASTM C, 05).

La norme ASTM mise en œuvre dans cette étude précise les dimensions du moule utilisé, notamment l'épaisseur du noyau central en acier. Sous l'effet du retrait du matériau cimentaire, les déformations du noyau central sont significatives. Elles sont suivies au cours du temps grâce à deux jauges extensométriques, opposées et collées à mi-hauteur suivant le cercle à l'intérieur du noyau central (figure 2.26).

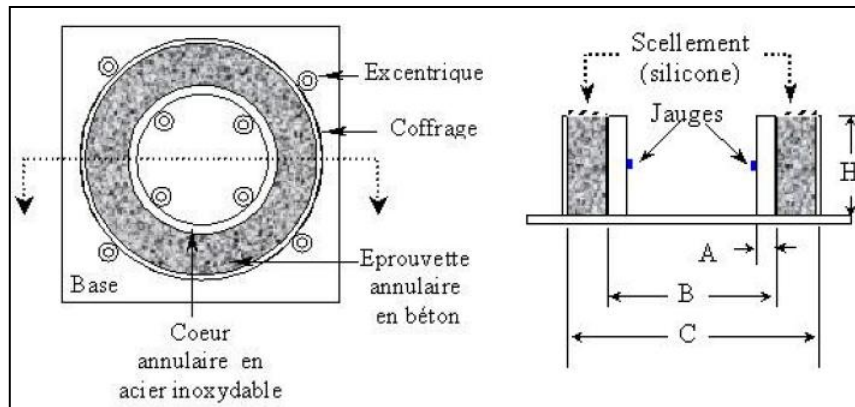


Figure 2.26. Essai de retrait empêché : (géométrie de l'éprouvette)

A= 13mm, B= 330mm, C= 406mm et H= 150mm (ASTM C, 05)

Les éprouvettes annulaires sont démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans une salle climatisée à 20°C et 50 % d'humidité relative.

Dix minutes après le coulage tous les excentriques sont débloqués et les jauges sont connectées au système d'acquisition. La norme recommande un intervalle d'enregistrement qui n'excède pas 30 minutes, nous avons procédé à un enregistrement toutes les 10 minutes (figure 2.27). 24 heures après le coulage, chaque éprouvette est démoulée, puis sa face supérieure scellée grâce à une couche de silicone.



Figure 2.27. Connexion des jauges aux appareils de mesure de déformation

3.3.5. Essais physico-chimiques

3.3.5.1. Absorption d'eau par capillarité

L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C (AFREM, 97). Les échantillons testés sont des disques 15x5 cm (trois échantillons par composition).

Le préconditionnement des échantillons est le suivant :

- Après démoulage, les échantillons sont conservés à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ dans une salle dont l'hygrométrie est supérieure ou égale à 95%. Le temps de cure humide est de 28 jours.
- A l'issue de la période de cure, les échantillons sont conservés dans une étuve ventilée à $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Durant cette période, le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,1%. Les éprouvettes sont ensuite conservées 12 heures à l'air libre à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.
- A l'issue de ce retour en température, la surface latérale de l'éprouvette est alors enduite de résine (ou de papier aluminium autocollant) pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai (figure 2.28 et 2.29).

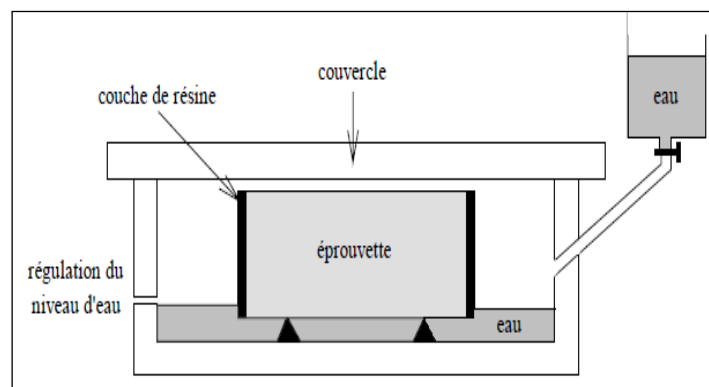


Figure 2.28. Dispositif expérimental de mesure d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce préconditionnement. Il consiste à suivre l'évolution de masse des éprouvettes plongées de 3 mm dans l'eau. Les échéances de mesure sont les suivantes : ¼, ½, 1, 2, 4, 8 et 24 heures.

Le coefficient d'absorption capillaire est défini par l'équation suivante (AFREM, 97) :

$$Ca = \frac{M_x - M_0}{A} \text{ en kg/m}^2 \quad (2.4)$$

M_x : masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg),

M_0 : masse initiale de l'éprouvette (kg),

A : section de l'éprouvette (m^2).

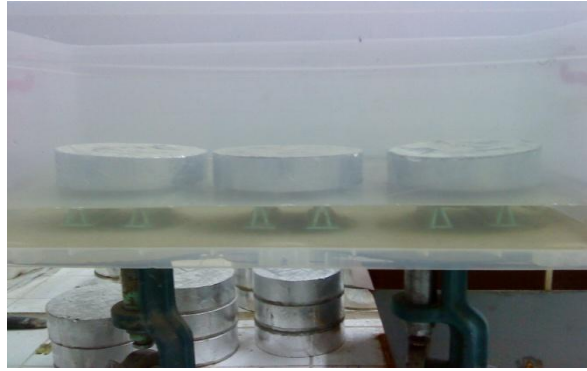


Figure 2.29. Photographie de l'essai d'absorption capillaire

3.3.5.2. Essai de carbonatation accélérée

L'objectif de cet essai est de caractériser le comportement d'échantillons de béton vis-à-vis de la carbonatation. L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaisseur de béton carbonaté d'échantillons conservés dans une atmosphère riche en dioxyde de carbone.

Les échantillons testés sont de forme prismatique (7x7x28 cm) mis en œuvre par gravité (BAP). Trois échantillons subissent l'essai de carbonatation accéléré : deux sont utilisés pour les mesures des épaisseurs de béton carbonaté et le dernier est utilisé pour suivre l'évolution de la masse au cours de l'essai (AFREM, 97).

La procédure de préconditionnement est la suivante :

- Les éprouvettes sont conservées après démoulage en ambiance humide (humidité relative supérieure à 95%) pendant 28 jours.
- Avant le démarrage de l'essai de carbonatation accéléré, les échantillons sont placés durant 48 heures dans une étuve ventilée réglée à une température de $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Les échantillons sont alors pesés puis disposés dans l'enceinte de carbonatation (espacés de 2 cm). L'enceinte de carbonatation accélérée (figure 2.30) est contrôlée en humidité relative (65%) et en dioxyde de carbone (50%), (AFREM, 97).



Figure 2.30. Enceinte de carbonatation

Les échéances de mesure de l'épaisseur de béton carbonaté sont les suivantes : 7, 14, 21, 28 et 365 jours. A chaque échéance, les échantillons sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté ainsi que les masses sont mesurées. Un morceau de béton (épaisseur 3 ± 1 cm) est prélevé sur chaque éprouvette. Les corps d'épreuve résiduels sont ensuite replacés immédiatement dans l'enceinte (AFREM, 97).

Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphaléine. Cette dernière révèle l'interface entre la zone saine et la zone carbonatée (figure 2.31). Les mesures correspondent aux distances (en mm) entre la surface externe du béton et le front de coloration, en dehors de zones particulières (coins et interfaces pâte-granulat).

Cinq distances sont déterminées pour chaque face : la distance la plus faible, la distance la plus importante, la moyenne relative aux trois distances intermédiaires (AFREM, 97).

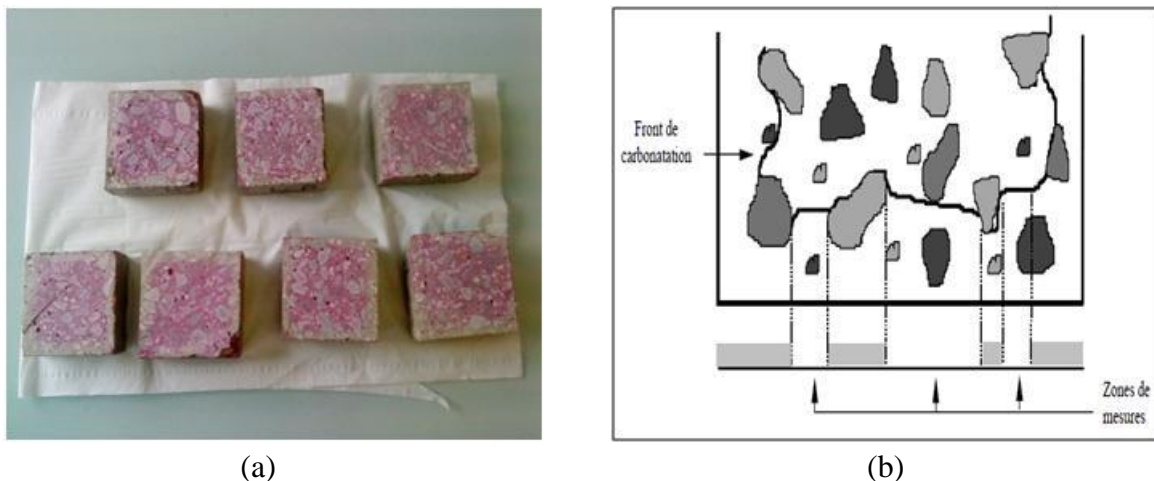


Figure 2.31. (a) : BAP dégradés par la carbonatation après 28 jours d'exposition, (b) : Le principe de mesure de l'épaisseur carbonaté

La valeur d'épaisseur carbonatée d'un béton à une échéance donnée est la moyenne des quatre faces (tableau 2.14).

Tableau 2.14. Calcul de la profondeur de carbonatation (exemple)

Échantillon					
Faces	5 distances (mm)	Distance mimi (mm)	Distance maxi (mm)	Moyenne des 3 distances intermédiaires	Moyenne sur l'échantillon (mm)
A	5-8-12-7-4	4	12	6,7	7,4
B	8-9-12-15-6	6	15	9,7	
C	2-4-8-6-5	2	8	5,0	
D	8-9-12-5-7	5	12	8,0	

3.3.5.3. Mesure de la porosité accessible à l'eau

Le présent mode opératoire décrit une méthode de détermination par pesée des éléments suivants :

- Détermination de la masse apparente d'un corps d'épreuve de béton après immersion dans un liquide.
- Détermination de sa masse dans l'air libre alors qu'il est encore imbibé de liquide.
- Détermination de la masse du corps d'épreuve sec. L'essai s'applique à des corps d'épreuve moulés ou sciés (AFREM, 97).

Les dimensions des corps d'épreuve recommandées doivent être trois fois le diamètre du plus gros granulat. Les échantillons testés sont des disques 11x5 cm. Il est souhaitable de procéder à la mesure de trois échantillons pour caractériser un béton.

Après démoulage, les échantillons sont conservés à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ dans une salle dont l'hygrométrie est supérieure ou égale à 95%. Le temps de cure humide est de 28 jours.

- **Imbibition du corps d'épreuve**

Placer le corps d'épreuve dans un récipient étanche. Une fois le récipient fermé, faire le vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante; maintenir ce vide pendant au moins 4 h. Pour s'assurer que le dégazage des corps d'épreuve est terminé, déconnecter le récipient de la pompe à vide et vérifier à l'aide d'un manomètre que la pression ne remonte pas dans le corps d'épreuve. Reconnecter le récipient à la pompe à vide et introduire progressivement l'eau d'immersion de façon qu'après 15 min, le corps d'épreuve soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. Maintenir cette pression réduite pendant $20 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ à $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, puis déconnecter la pompe et ouvrir le récipient (figure 2.32).



Figure 2.32. Mesure de la porosité accessible à l'eau

- **Détermination de la masse du corps d'épreuve immergé**

Suspendre le corps d'épreuve à l'aide d'un fil à partir du système de suspension de la balance hydrostatique et le peser complètement immergé dans une certaine quantité d'eau

d'immersion contenue dans un bêcher. On obtient ainsi la masse M_{eau} du corps d'épreuve immergé. La pesée doit être effectuée à 0,01 g près (AFREM, 97).

- **Détermination de la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air**

Extraire le corps d'épreuve de l'eau et l'essuyer rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge humide, afin de le débarrasser des gouttelettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores.

Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à 0,01 g près. S'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de pesées. On obtient, de cette manière, la masse M_{air} du corps d'épreuve imbibé.

- **Détermination de la masse du corps d'épreuve sec**

Sécher le corps d'épreuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à une masse constante, c'est à dire jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 h à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de 0,05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche (M_{sec}).

- La porosité accessible à l'eau (ε), exprimée en pourcentage est donnée par l'équation :

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} * 100 \quad (2.5)$$

Dans les équations (1) et (2) :

M_{eau} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve immergé dans l'eau.

M_{air} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air.

M_{sec} : est la masse, en gramme, du corps d'épreuve sec.

4. CONCLUSION

Dans cette étude expérimentale nous avons caractérisé les constituants utilisés pour la formulation des bétons autoplaçants. Nos matériaux sont caractérisés selon des modes opératoires normalisés (EN 206 – 9, 10), selon des recommandations (AFGC, 08) ou encore des procédures spécifiques et tests accélérés.

Les graviers utilisés présentent des distributions granulométriques continues pour les deux types (4/8 et 5/15). Mais le sable de dune utilisé dans notre recherche est un sable fin, donc il était nécessaire d'introduire un sable gros (concassé) pour corriger la granulométrie et augmenter la compacité du mélange.

La fibre de diss non bouillie (naturelle) contient un pourcentage élevé des matières hydrosolubles par rapport à la fibre de diss bouillie. En plus, la plus part de ces hydrosolubles sont constituées de cellulose (60%) ce qui entraîne un retard de prise de ciment. Donc, il était essentiel d'utiliser un traitement pour extraire certains composés organiques.

Le troisième chapitre sera consacré à la formulation et la caractérisation des BAP avec substitution du filler calcaire par le laitier cristallisé dans une première étape. Ainsi, la deuxième étape du chapitre sera consacrée à l'introduction de la fibre de Diss avec différents dosages dans les BAP formulés et conduire une comparaison des caractéristiques à l'état frais et à l'état durci, avec un BAP renforcé de fibre de polypropylène comme béton témoin.

CHAPITRE III
FORMULATIONS DES BÉTONS

CHAPITRE III

FORMULATIONS DES BÉTONS

Sommaire

1. INTRODUCTION	75
2. MÉTHODE DE FORMULATION DES BAP	75
2.1. Composition théorique des BAP.....	76
2.2. Ajustement des dosages pour satisfaire les propriétés rhéologiques des BAP....	78
2.3. Composition du BAP de référence et BAP d'étude	78
3. COMPOSITION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS	80
4. CONCLUSION	81

Chapitre III

Formulations des bétons

1. INTRODUCTION

Dans cette étude, nous avons réalisé un mélange autoplaçant à base de matériaux locaux. La fabrication des bétons (BAP et BAP fibrés) a été effectuée au sein du laboratoire matériaux, géo matériaux et environnement.

Contrairement aux bétons classiques, la formulation d'un BAP est plus complexe. En plus, le BAP exige la réalisation de plusieurs essais à l'état frais (essai au cône d'Abrams, la boîte en L et la stabilité au tamis).

Selon la bibliographie (Turcry, 04), il existe plusieurs méthodes de formulation des BAP. La formulation utilisée dans notre travail est basée sur une combinaison d'une approche pratique recommandée par l'AFGC (AFGC, 08) et la méthode de Dreux Gorisse. Cette méthode est expérimentale et son utilisation demande de faibles moyens.

Notre travail est organisé en deux parties

- **Première partie :**

- Composition du béton de référence sans aucune addition (BAPR).
- Optimisation du dosage en superplastifiant sur béton de référence.
- Incorporation des additions de FC et LC avec trois dosages différents (30, 45 et 60 %) par rapport à la masse du ciment (BAPFC et BAPLC).
- Étude comparative des BAPFC et BAPLC et optimisation des dosages en additions.

- **Deuxième partie :**

- Incorporation des fibres de Diss et de polypropylène dans les BAP optimisés.
- Étude comparative des BAPFC et BAPLC fibrés et optimisation des dosages en fibres de polypropylène (témoin) et Diss (étude).

2. MÉTHODE DE FORMULATION DES BAP

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années (AFGC, 08). Cependant, la formulation d'un BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, ce dernier est composé d'un nombre minimal de six constituants, contre quatre dans le cas d'un BO. Puis, les caractéristiques des BAP sont contradictoires, une pâte fluide peut rendre le béton très sensible à la ségrégation.

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP dans cette étude expérimentale est basée sur les points suivants :

- La formulation du BAP doit répondre aux critères de résistance mécanique (fixée ou désirée) choisis à partir de la formulation de Féret :

$$f_{bc} = \frac{K R_c}{(1+3,15\frac{e}{c})^2} \quad (3.1)$$

f_{bc} : la résistance moyenne du béton en [MPa].

R_c : résistance à la compression du ciment en [MPa].

K : un coefficient qui vaut en moyenne 4,9 ($\pm 15\%$).

e : quantité d'eau efficace en [litre].

c : dosage en ciment en [kg].

• **Remarque:** Nous avons posé comme résistance caractéristique en compression à 28 jours pour un béton d'ouvrage $f_{bc\ 28} = 30$ MPa.

- Le dosage en ciment se situe entre 300 et 350 kg/m³
- En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le volume de pâte doit favoriser l'écoulement du béton tout en réduisant le coût en matières premières de la formulation. Pour cela, (eau + ciment + additions + adjuvant) varie entre 330 et 400 l/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation. Ce dosage est déterminé de manière expérimentale à partir d'essais sur béton frais pour lequel le diamètre d'étalement doit être compris entre 600 et 750 mm (AFGC, 08).
- La composition du squelette granulaire est optimisée afin de réduire la ségrégation et favoriser l'écoulement. Pour cela, on a fixé ($D_{max} = 15$ mm et un rapport G/S proche de 1).
- Les dosages en granulats et l'eau sont estimés à partir de la méthode de Dreux Gorisse, mais les dosages définitifs sont déterminés en apportant les corrections nécessaires sur des gâchées expérimentales. Ainsi, un béton de référence (BAPR) a été formulé sans aucune addition en visant un étalement de 60 à 70 cm.

2.1. Composition théorique des BAP

Pour étudier l'effet du volume de pâte, on a commencé d'abord par la préparation d'un BAP de référence (sans addition). L'essai d'étalement nous a permis d'optimiser la composition finale du BAP de référence après l'obtention d'un étalement supérieur à 600 mm.

✓ Dosage en ciment :

Selon l'AFGC, le dosage de ciment est de $C = 350$ kg/m³.

✓ Dosage en eau :

Pour déterminer le dosage en eau et le dosage optimal en adjuvant, on s'est basé sur les essais effectués sur le cône d'Abrams.

On a fixé un rapport E/C optimal $\rightarrow E/C = 0,5 \rightarrow E = 175$ l/m³.

✓ **Dosage en granulat :**

Traçage du OAB sur les courbes granulométriques : $X = 8$ et $Y = 61,17$.

Ainsi, la figure 3.1 montre le volume des granulats utilisés.

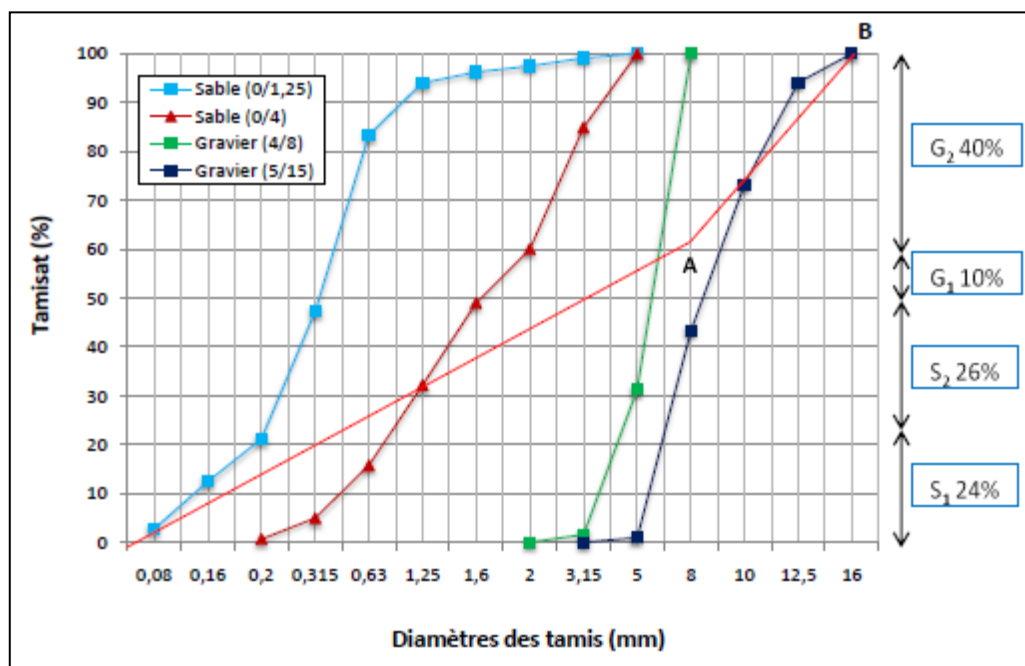


Figure 3.1. Optimisation du volume des granulats

Le dosage des granulats est basé sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire (gravier + sable). Les dosages obtenus correspondent à un rapport $G/S = 0,98$, ce qui satisfait les recommandations de l'AFGC (AFGC, 08). La composition du BAP a été déterminée de façon expérimentale en s'appuyant sur les résultats obtenus au cône d'Abrams et en ajustant les paramètres de formulation suivants :

- Choix et dosage du plastifiant : Le plastifiant BV40 a été utilisé pour la formulation des BAP 1 et 2 pour un dosage de 1% par rapport à la masse du ciment. Les affaissements obtenus sont 10 et 15 (cm). Ces résultats insuffisants pour satisfaire le caractère autoplaçant nous ont incités à opter pour un autre type de plastifiant (Viscocrete 3045) en optimisant son dosage.

- Dosage en eau : Afin de satisfaire deux paramètres à priori contradictoires que sont la fluidité et la stabilité, une seule correction du dosage en eau a été réalisée de 175 à 185 (l/m^3). La synthèse des résultats est présentée par le tableau 3.1.

La formulation N°8 a donné un meilleur étalement mais présentant des signes de ressuage d'eau et pour cela, la composition N°7 a été retenue comme formulation de base parce qu'elle a donné un étalement de 68 cm satisfaisant les valeurs projetées (65 à 75 cm), et sans présenter des signes de ségrégation ou de ressuage (figure 3.2).

Tableau 3.1. Formulations des BAP

	Ciment	Eau	E/C	BV40	Sables		Gravillon 4/8	Gravier 5/15	Affaissement
					0/1,2	0/4			
Unités	kg/m ³	l/m ³	-	%	kg/m ³		kg/m ³	kg/m ³	cm
BAP 1	350	175	0,50	1	418	449	171	686	AC = 10
BAP 2	350	185	0,52	1	418	449	171	686	AC = 15
				Visco 3045					Etalement
BAP 3	350	185	0,52	1	418	449	171	686	54
BAP 4	350	185	0,52	1,5	418	449	171	686	62
BAP 5	350	185	0,52	1,8	418	449	171	686	67
BAP 6	350	185	0,52	2	418	449	171	686	71
BAP 7	350	175	0,50	2	418	449	171	686	68
BAP 8	350	175	0,50	2,2	418	449	171	686	72

**Figure 3.2.** Etalement d'un BAP (Formulation N° 7)

2.2. Ajustement des dosages pour satisfaire les propriétés rhéologiques des BAP

L'ajustement de la formulation concerne les points suivants :

- La quantité de gravier est diminuée afin de rassurer la demande en pâte. Cette dernière doit être fluide pour assurer un bon enrobage des granulats et une ouvrabilité suffisante qui dépend aussi de l'adjuvant et du rapport eau / liant (A. S. Mohamed, 11).
- Optimisation du dosage en eau pour maîtriser d'une part la stabilité du béton mais aussi pour garantir sa fluidité à l'état frais et sa résistance mécanique à l'état durci.
- Afin d'obtenir une pâte fluide, homogène et stable, il est nécessaire de trouver un équilibre entre le rapport (eau / liant) et par conséquent le dosage en addition et le dosage en plastifiant.

2.3. Composition du BAP de référence et BAP d'étude

La quantité des différents constituants du béton doit être calculée en volume. Pour cela, on calcule le volume de chaque constituant dans un mètre cube (1000 litres) de béton autoplaçant. Ce volume est obtenu en divisant la masse de chaque constituant par sa masse volumique.

$$Volume (m^3) = \frac{masse (kg)}{masse volumique (\frac{kg}{m^3})} \quad (3.2)$$

Généralement, la teneur en air occlus d'un BAP varie entre 1 et 3% (A. S. Mohamed, 11) et dans ce travail elle est égale à 2% du volume total du béton soit 20 l/m³. Le tableau 3.2 résume la composition du BAP de référence.

Tableau 3.2. Composition du BAP de référence (sans addition)

Constituants	Volume en litre
Ciment	114
Eau	175
Sable fin	164,5
Sable gros	178
Gravillon	68,5
Gravier	274
Adjuvant	6
Air occlus	20
Σ	1000

Après la fixation de la composition du BAP de référence (sans addition), on a introduit deux additions de différentes natures (filler calcaire et laitier cristallisé) afin d'assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, pour cela trois différents dosages de chaque addition (30, 45 et 60%) par rapport à la masse du ciment, ont été utilisés. Le tableau 3.3 regroupe les différentes compositions des BAP :

Tableau 3.3. Composition des BAP d'étude.

BAP	Addition	Ciment	Eau	E/C	Adjuvant	Sable		Gravier		V pâte
						0/1,25	0/4	4/8	5/15	
Unités	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	-	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	l/m ³
Réf	-	350	175	0,5	7	418	449	171	686	295
FC 30	105	350	175	0,5	7	394	424	162	647	333
FC 45	157	350	175	0,5	7	383	412	157	628	352
FC 60	210	350	175	0,5	7	371	399	152	609	371
LC 30	105	350	175	0,5	7	397	426	163	651	330
LC 45	157	350	175	0,5	7	386	415	158	634	347
LC 60	210	350	175	0,5	7	376	404	154	616	364

Dans le tableau 3.3, on remplace le laitier cristallisé par les lettres (LC), le filler de calcaire par (FC). Le nombre qui accompagne chaque désignation correspond au dosage de l'addition exprimé en pourcentage par rapport à la masse du ciment.

3. COMPOSITION DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS FIBRÉS

Le béton autoplaçant fibré a été formulé à partir des mêmes constituants et les mêmes dosages utilisés pour le BAP non fibré (à base de 30 % d'addition du filler calcaire ou du laitier cristallisé par rapport à la masse du ciment). Ensuite, ces BAP ont été renforcés par des fibres de polypropylène (PP) et de diss (D).

Le dosage en fibres de polypropylène utilisé est de $0,6 \text{ kg/m}^3$ (l'optimum recommandé par le fabricant), (Granifibres, 07). Cependant, pour étudier l'influence du volume de fibre sur le comportement des BAP à l'état frais et à l'état durci, deux autres dosages ont été utilisés ($0,3$ et $0,9 \text{ kg/m}^3$).

Dans le but de garder les mêmes taux volumiques de fibrage et vu les différences des masses volumiques des fibres de polypropylène et de diss, le dosage massique de la fibre de diss dans les BAP a été majoré par un coefficient (K) qui est égal au rapport des masses volumiques des deux types de fibres.

- Coefficient correcteur du dosage de la fibre de diss :

$$K = \frac{\rho_{diss}}{\rho_{pp}} \quad (3.3)$$

K : coefficient correcteur

ρ_{diss} : densité de la fibre de diss en (g/cm^3)

ρ_{pp} : densité de la fibre de polypropylène en (g/cm^3).

- Le dosage massique des fibres de diss est déterminé par la relation suivante :

$$m_{diss} = K m_{pp} \quad (3.4)$$

m_{diss} : dosage massique des fibres de diss en (kg)

m_{pp} : dosage massique des fibres de polypropylène en (kg).

Les dosages massiques et les taux volumiques des fibres utilisées pour 1 m^3 de béton sont donnés au tableau 3.4.

Tableau 3.4. Dosages massiques des fibres

Fibre	Dosage en kg			Volume en %		
	Polypropylène (PP)	0,3	0,6	0,9	0,03	0,06
Diss (D)	0,4	0,8	1,2	0,03	0,06	0,1

- **Remarque :**

Dans une première approche, deux BAP avec addition de 30 % de filler calcaire et renforcés de 400 g/m^3 de fibre de diss à l'état sec et pré-mouillé ont été testés. Le BAP avec fibres de diss pré-mouillées a donné un étalement de 68 cm alors que le BAP avec fibres de diss séchées a donné un étalement de 64 cm. Ces résultats nous ont incité à travailler avec la

fibres de diss pré-mouillée afin d'éviter une grande diminution de l'étalement. Le pré-mouillage est réalisé par la conservation des fibres de diss sous l'eau pendant 2 heures (Sellami, 15).

L'étude de l'effet des fibres sur les propriétés des bétons a été réalisée sur un total de douze bétons autoplaçant renforcés par des fibres synthétiques et végétales. Le tableau 3.5 réunit les différentes compositions des BAP fibrés :

Tableau 3.5. Compositions des BAP avec fibre de polypropylène et diss

	Unités	BAP							
		Filler calcaire (FC)				Laitier cristallisé (LC)			
		BAPFCP / BAPFCD				BAPLCP / BAPLCD			
Fibre PP	kg/m ³	0	0,3	0,6	0,9	0	0,3	0,6	0,9
Fibre Diss	kg/m ³	0	0,4	0,8	1,2	0	0,4	0,8	1,2
FC	kg/m ³	105	105	105	105	-	-	-	-
LC	kg/m ³	-	-	-	-	105	105	105	105
Ciment	kg/m ³	350	350	350	350	350	350	350	350
Eau	kg/m ³	175	175	175	175	175	175	175	175
Adjuvant	kg/m ³	7	7	7	7	7	7	7	7
E/L	-	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
G/S	-	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
S 0/1,25	kg/m ³	394	394	394	394	397	397	397	397
S 0/4	kg/m ³	424	424	424	424	426	426	426	426
G 4/8	kg/m ³	162	162	162	162	163	163	163	163
G 5/15	kg/m ³	647	647	647	647	651	651	651	651

BAPFCP – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de polypropylène

BAPFCD – Béton autoplaçant avec filler calcaire et fibre de diss

BAPLCP – Béton autoplaçant avec laitier cristallisé et fibre de polypropylène

BAPLCD – Béton autoplaçant avec laitier cristallisé et fibre de diss

4. CONCLUSION

Dans ce travail, le BAPR (de référence) a été formulé sans aucune addition. Cependant, sa fluidité a été garantie grâce à l'utilisation d'un adjuvant de type plastifiant (Viscocrete 3045) mais présente une instabilité caractérisée par un manque d'homogénéité.

Le dosage en adjuvant optimal qui est proche de son dosage à saturation, est déterminé par rapport au poids du ciment uniquement et permet ainsi de diminuer le dosage en eau tout en gardant une bonne fluidité du mélange (étalement égal à 680 mm pour le BAPR).

L'instabilité du BAPR résulte du volume de pâte assez faible (295 litre) alors que l'AFGC recommande un volume de pâte de 330 litre minimum, ce qui justifie l'emploi des

additions dans les BAP afin d'éviter d'augmenter le dosage en ciment ce qui se traduirait par une augmentation du cout du béton et des risques de fissuration résultant d'une forte exothermie.

Dans le but d'optimiser la proportion des additions dans les BAP, trois dosages 30, 45 et 60 (%) par rapport à la masse du ciment ont été utilisés. Les bétons autoplaçants fibrés ont été formulé à partir des mêmes constituants et les mêmes dosages utilisés pour le BAP non fibré (avec addition de 30 % de filler calcaire ou du laitier cristallisé).

Dans le but d'étudier les effets du fibrage sur les propriétés des BAP deux types de fibres ont été utilisés : une fibre synthétique de polypropylène (témoin) et une fibre végétale de Diss (d'étude) avec trois dosages (0,3 – 0,6 et 0,9 kg/m³), dont celui recommandé par le fabricant « 0,6 kg/m³ » (Granifibres, 07).

Dans le but de garder les mêmes taux volumiques de fibrage et vu les différences des masses volumiques des fibres de polypropylène et de diss, le dosage massique de la fibre de diss dans les BAP a été majoré par un coefficient (K) qui est égal au rapport des masses volumiques des deux types de fibres.

Après avoir terminé de mettre en place les compositions optimales des BAP avec et sans fibrage, l'étude de l'effet des additions sur le comportement des BAP à l'état frais et durci est conduite et portée au chapitre IV.

CHAPITRE IV
EFFET DES ADDITIONS SUR LES
PROPRIÉTÉS DES BAP

CHAPITRE IV

EFFET DES ADDITIONS SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

Sommaire

1. INTRODUCTION	85
2. OUVRABILITÉ DES BAP	85
3. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS	86
3.1. Etalement au cône d'Abrams.....	86
3.2. Temps T_{500}	87
3.3. Écoulement à la boîte LCPC.....	88
3.4. Taux de remplissage dans la boîte en L.....	89
3.5. Stabilité au tamis.....	90
3.6. Propriétés rhéologiques.....	91
3.6.1. Seuil de cisaillement.....	91
3.6.2. Viscosité plastique.....	92
4. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT DURCI	93
4.1. Caractérisation mécanique des BAP.....	93
4.1.1. Résistance en compression.....	93
4.1.2. Cinétique de durcissement des BAP avec additions.....	97
4.1.2.1. Cas des BAP avec FC.....	97
4.1.2.2. Cas des BAP avec LC.....	97
4.1.3. Étude comparative entre la résistance de FC et de LC.....	98
4.1.4. Résistance en traction par flexion.....	100
4.1.5. Vérification de l'absence de ségrégation.....	100
4.1.5.1. Béton de référence.....	100
4.1.5.2. Béton avec addition de filler calcaire.....	101
4.1.5.3. Béton avec addition de laitier cristallisé.....	101
5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	102
5.1. Absorption capillaire.....	103
5.1.1. Perte de masse.....	103
5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire.....	103
5.2. Porosité accessible à l'eau.....	104
5.3. Carbonatation accélérée.....	105
5.3.1. Suivi de masse.....	105
5.3.2. Profondeur carbonatée.....	106
6. CONCLUSION	107

Chapitre IV

Effet des additions sur les propriétés des BAP

1. INTRODUCTION

Après avoir mis en place les formulations des BAP de références (sans addition) (BAPR) et avec addition de filler calcaire (BAPFC) et de laitier cristallisé (BAPLC), nous présentons dans ce chapitre l'effet des additions minérales sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci. Ainsi, les différentes propriétés des BAP ont été caractérisées par des essais normalisés.

La présentation et la discussion des résultats permettront de mettre en évidence le rôle de l'addition et aussi de comparer une nouvelle addition comme le laitier cristallisé par rapport au filler calcaire traditionnellement utilisé, en utilisant trois dosages : 30, 45 et 60 % par rapport à la masse de ciment.

En plus des caractéristiques rhéologiques et mécaniques, d'autres propriétés des bétons ont été étudiées dans cette partie. En effet, ce projet de recherche s'attache aussi sur l'évaluation de la durabilité des bétons autoplaçants. Toutefois, l'étude de la durabilité des BAP nécessite des équipements complexes pour certains tests. En effet, des essais de carbonatation, de porosité accessible à l'eau et l'absorption capillaire ont été réalisés pour étudier la capacité du béton à résister à la pénétration de l'eau et la diffusion du dioxyde de carbone.

2. OUVRABILITÉ DES BAP

Pour caractériser l'ouvrabilité et la stabilité des BAP formulés, nous avons utilisés des essais recommandés (AFGC, 08 ; NF EN 206 – 9, 10). L'essai de la boîte du LCPC a été utilisé pour évaluer les paramètres rhéologiques notamment le seuil de cisaillement des BAP.

La conduite de tous les essais d'ouvrabilité et de rhéologie en même temps et avec des gâchées identiques, nécessite une équipe d'opérateur, beaucoup de matériaux et des temps d'expérimentation conséquents. Il fallait donc improviser et adopter une stratégie de conduite des essais que nous avons résumés dans les points suivants :

- Après l'arrêt du malaxage, un volume de 10 litres de béton est conservé à l'abri de l'évaporation pendant une durée de 15 min pour l'essai de stabilité au tamis.
- Après 2 min, l'essai d'étalement au cône d'Abrams est accompli.
- Puis, l'essai de la boîte LCPC est réalisé.
- Le béton est ensuite récupéré et remalaxé pendant 20 à 25 secondes afin de réaliser l'essai de la boîte en L.
- Les 15 minutes de repos étant écoulées, on effectue alors l'essai de stabilité au tamis.
- Enfin, on termine par la mesure du pourcentage de l'air occlus.

3. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS

3.1. Étalement au cône d'Abrams

Selon la norme (NF EN 12350 – 8, 10), l'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre (550 et 850 mm).

Les résultats obtenus, montrés sur la figure 4.1 confirment que tous les bétons ont des valeurs d'étalement comprises dans le domaine des BAP.

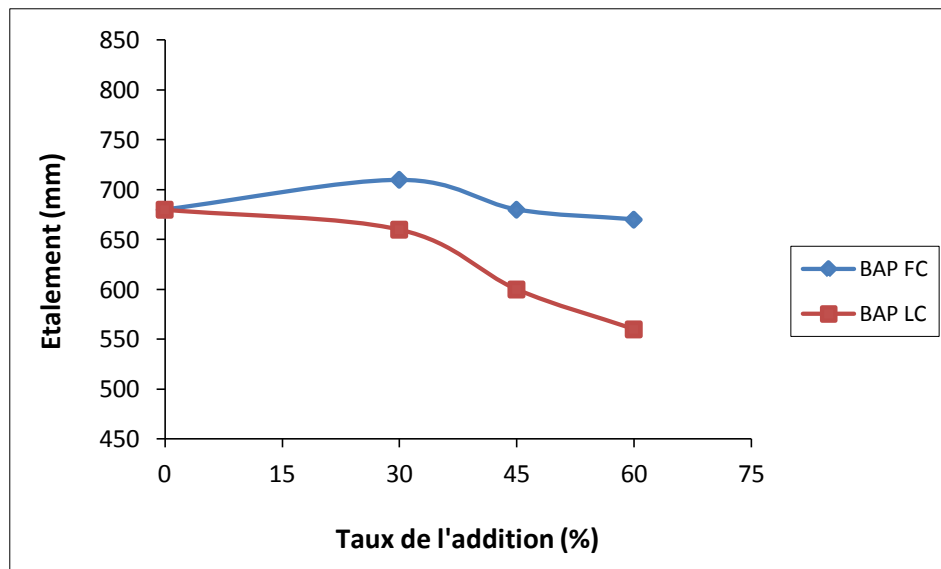


Figure 4.1. Influence des additions sur l'étalement des BAP

Le béton de référence (sans addition), sert comme formulation de base pour les autres compositions des BAP. Nous avons obtenu un bon étalement en introduisant uniquement un superplastifiant, ce qui dénote du bon choix des matériaux et de l'approche efficace de formulation. En effet, nous sommes parvenus à un étalement qui se situe dans la fourchette des valeurs fixées par les normes (étalement de 680 mm).

L'ajout du laitier cristallisé sous forme de poudre comme addition au BAP a une grande influence sur l'étalement parce qu'il entraîne une diminution de la fluidité, surtout pour les dosages de 45 et 60 %.

L'incorporation du filler calcaire comme addition au BAP à peu d'influence sur l'étalement, on note une légère augmentation de l'étalement pour le BAP FC 30 et une légère diminution de la fluidité pour le BAP FC avec un dosage de 60 %.

(S.G. Oh *et al*, 99) ont montré que la couche de pâte qui enveloppe les granulats diminue les contacts entre les particules. En effet, plus l'épaisseur de cette couche est importante, plus l'espace entre les granulats est important, ce qui minimise les frottements entre les particules.

Les additions finement broyées occupent et 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, 05), ce qui se traduit par une meilleure stabilité. Cependant, au delà d'un dosage critique, la viscosité du mortier augmente avec l'ajout de l'addition, surtout pour le laitier cristallisé.

Le laitier cristallisé n'améliore pas l'étalement, mais entraîne plutôt une diminution de la fluidité (660 mm pour le BAPLC 30). Alors que le filler calcaire améliore l'étalement (710 mm pour le BAPFC 30), mais au-delà de cette valeur, on note plutôt une légère diminution de l'étalement. Le laitier cristallisé a une demande en eau importante par rapport au filler calcaire (Cyr, 03) ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton. En effet, des mesures de consistance normale à l'aide de la sonde de Vicat, réalisées sur des pâtes pures de filler calcaire et de laitier cristallisé ont donné des rapports (eau/ pâte) respectivement $E/FC = 0.23$ et $E/LC = 0.25$. D'après (Shi *et al*, 98) le laitier adsorbe le superplastifiant. L'influence des additions minérales sur l'ouvrabilité des bétons est fonction de leur dosage et de leur nature (Zhang et Han, 00).

3.2. Temps T_{500}

Grâce à l'essai au cône d'Abrams, on mesure deux paramètres : l'étalement et le T_{500} , ce dernier indique le temps que met la galette de béton pour atteindre un étalement de 500 mm (figure 4.2).

Le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500 mm donne une idée sur la vitesse de déformation du béton. Les BAPLC et BAPFC présentent des viscosités importantes, en effet on a noté des T_{500} supérieures aux T_{500} du BAPR (sans addition).

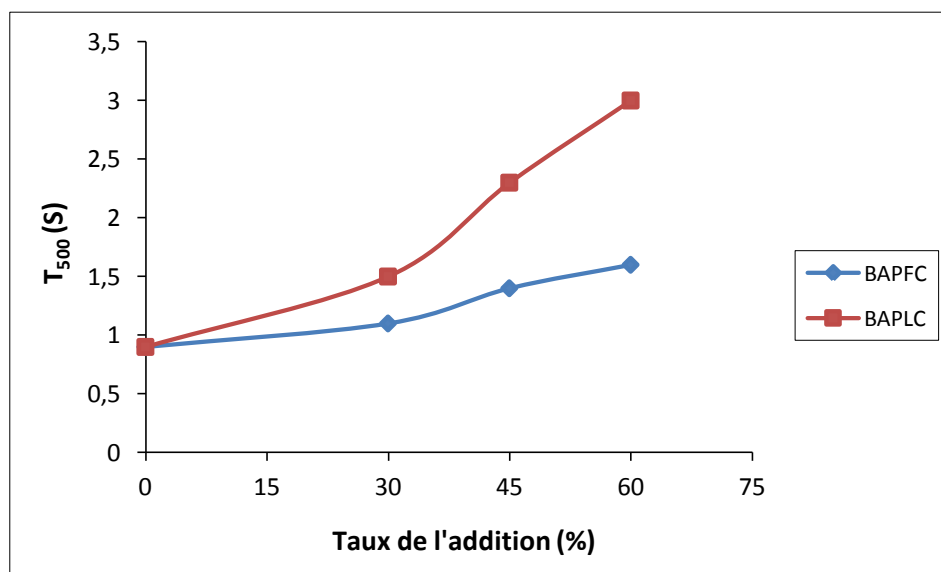


Figure 4.2. Influence des additions sur le T_{500} des BAP

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage des additions entraîne une augmentation du temps d'étalement, surtout pour les BAP avec 45 et 60 % du laitier cristallisé qui donnent des T_{500} supérieurs à 2 secondes (NF EN 206-9, 10). L'ajout des additions augmente le temps d'écoulement, traduisant l'augmentation de la viscosité, justifié d'une part par l'augmentation de la concentration des solides et les demandes en eau relative à chaque addition.

3.3. Écoulement à la boîte LCPC

Les résultats obtenus et présentés par la figure 4.3, montre que la longueur d'écoulement de BAP R est largement supérieure à celle des autres mélanges, mais caractérisée par un ressuage et une ségrégation établit, correspondant pratiquement à l'étalement du coulis de ciment qui s'est détaché des granulats.

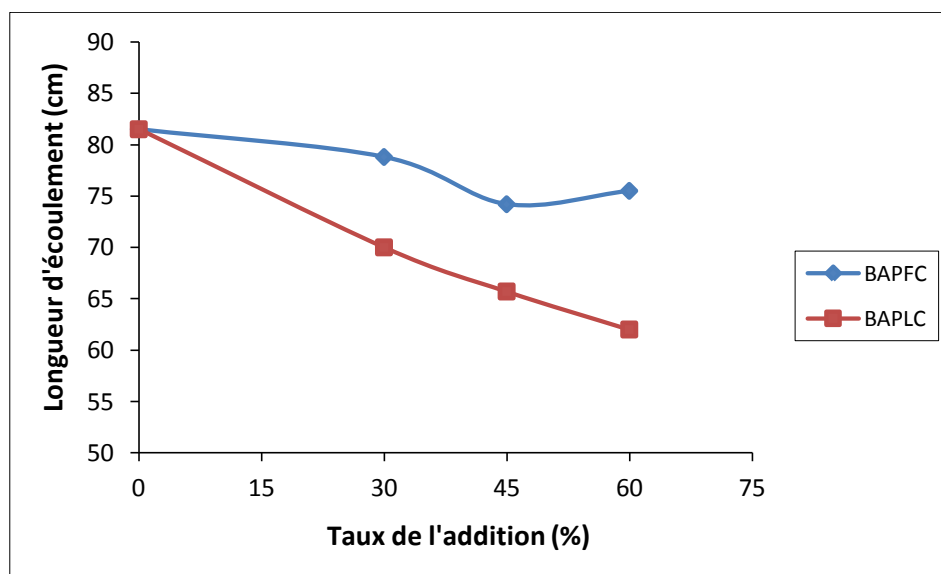


Figure 4.3. Influence des additions sur la longueur d'écoulement des BAP

Le BAPLC donne des valeurs d'écoulement inférieures à celles du BAPFC, cette différence augmente avec l'augmentation du dosage en additions.

L'augmentation du dosage en LC a provoqué une augmentation de la viscosité du mélange qui a rendu l'écoulement plus difficile.

Les résultats sur l'écoulement des BAP obtenus au moyen du canal de Roussel sont quasiment identiques à ceux obtenus au moyen du cône, il faut rappeler que le volume du matériau testé est le même pour les deux essais. La similitude des résultats est validée par une corrélation remarquable présentée par la figure 4.4. Les résultats obtenus sur l'écoulement corroborent les résultats obtenus sur la longueur d'écoulement.

Les additions garantissent les paramètres d'autoplaçance des BAP, par l'amélioration de la stabilité (diminue ou élimine le ressuage) et l'homogénéité (empêche la ségrégation par

l'augmentation du volume et de la viscosité de la pâte), ce qui a pour conséquence la diminution de l'écoulement au delà d'un certain seuil de dosage en addition surtout pour les additions dont la demande en eau est relativement importante (laitier cristallisé).

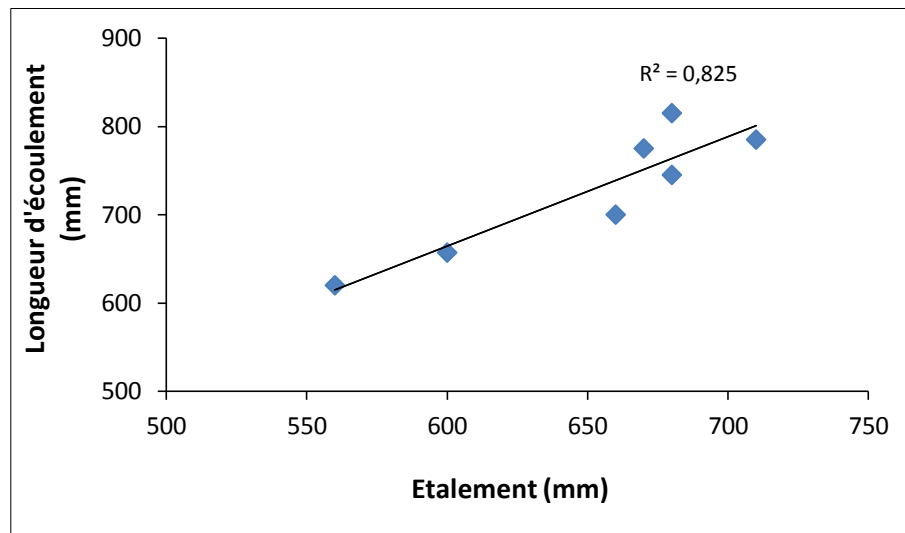


Figure 4.4. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams

3.4. Taux de remplissage dans la boîte en L

Afin d'assurer les propriétés d'autoplaçance d'un BAP, il est nécessaire de vérifier son écoulement à travers des barres d'armatures plus ou moins dense sous l'effet unique de la pesanteur. Pour cela, l'essai de la boîte en L avec trois barres en acier a été utilisé pour mesurer le taux de remplissage des BAP (figure 4.5).

Le BAP R donne une valeur égale à 0,78 inférieure à celle fixée par les normes (NF EN 12350 – 8, 10) qui doit être ($H_2/H_1 \geq 0,8$), ce qui le disqualifie en tant que béton autoplaçant car il ne présente pas un bon comportement en milieu confiné. En effet le volume de pâte du BAPR est insuffisant pour entraîner les gros granulats et garantir un remplissage correct des coffrages.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du dosage en laitier provoque une augmentation de la mobilité du béton en milieu confiné, jusqu'à un dosage de 45 %, au-delà de ce dosage, le béton subit des phénomènes de blocage ($H_2/H_1 = 0,73$ pour le BAP LC 60). La figure 4.5 montre l'influence apportée par le laitier cristallisé.

Le dosage optimal donnant le meilleur taux de remplissage est 30% pour les deux additions, au-delà de ce dosage, on relève une diminution du pouvoir de remplissage des BAP, même si le FC donne les meilleurs taux de remplissage pour tous les dosages en raison de sa demande en eau moindre par rapport au LC.

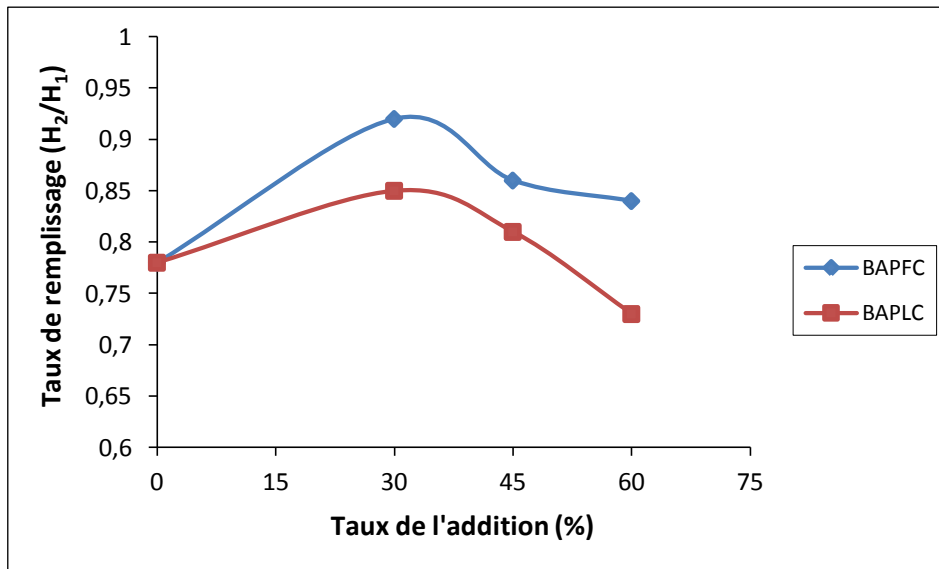


Figure 4.5. Influence des additions sur le taux de remplissage des BAP

La diminution du pouvoir de remplissage peut être expliquée par l'augmentation de la concentration en solide qui augmente le seuil de cisaillement des BAP comme nous le présenterons dans la suite de l'exposé des résultats dans ce même paragraphe.

Cependant, Tous les mélanges avec addition donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, sauf le BAPLC 60 qui donne un rapport H_2/H_1 de (0,73), corroborant ainsi, les résultats obtenus sur l'étalement.

3.5. Stabilité au tamis

Le BAPR a une stabilité au tamis de 10,46 % (figure 4.6), largement inférieure aux valeurs limites préconisées (< 20% ou <15%) par la norme (NF EN 12350 – 8, 10), cela ne signifie pas que le BAPR peut être qualifié de béton autoplaçant car plus la quantité de laitance est importante, plus le BAP présente des risques d'instabilité.

Les additions réduisent la quantité de laitance, ce qui se traduit par une meilleure stabilité (moins de ressuage et meilleure résistance à la ségrégation), (Sedran, 99). Cette amélioration de la stabilité dépend du dosage et du type de l'addition. En effet au-delà de 45% de LC la quantité de laitance diminue au dessous de 5% ; la stabilité du BAP devient critique, car la viscosité du mortier évolue vers des valeurs importantes qui empêchent le BAP de s'écouler et de remplir les coffrages correctement, on observera alors une mauvaise qualité de parement (Cussigh et De Schutter, 03).

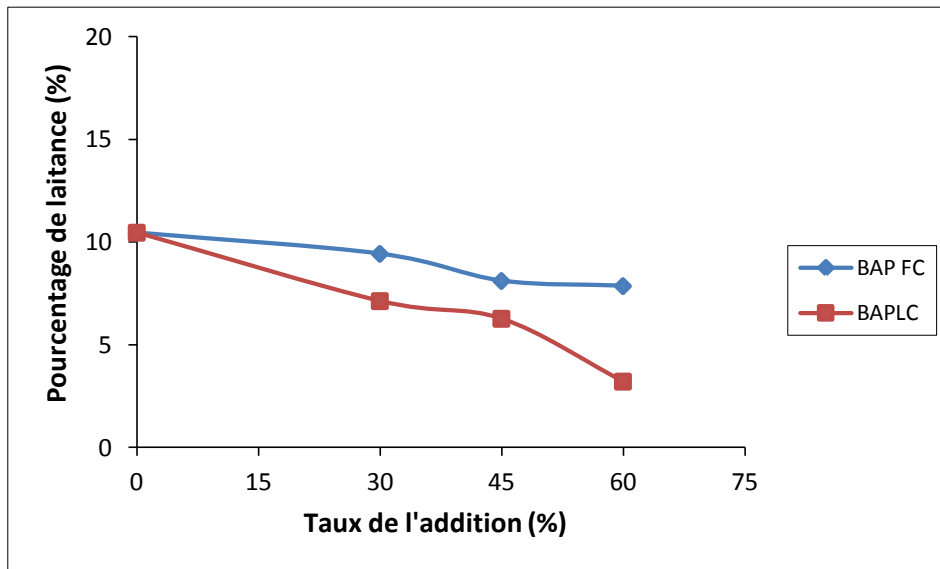


Figure 4.6. Influence des additions sur la stabilité au tamis des BAP

3.6. Propriétés rhéologiques

3.6.1. Seuil de cisaillement

La figure 4.7 montre l'évolution du seuil de cisaillement des mélanges en fonction du taux de fines utilisé. L'augmentation du dosage des additions entraîne une augmentation du seuil de cisaillement. Les BAP avec filler calcaire présentent une légère augmentation du par rapport au BAPR, ce qui conforte et explique les résultats obtenus sur le taux de remplissage

Pour éviter les risques de ségrégation et garantir la fluidité et la mobilité d'un BAP, la valeur du seuil de cisaillement doit être inférieure à 200 Pa (Wallevik, 03), ce qui a été largement satisfait par les résultats obtenus et présentés par la figure 4.7.

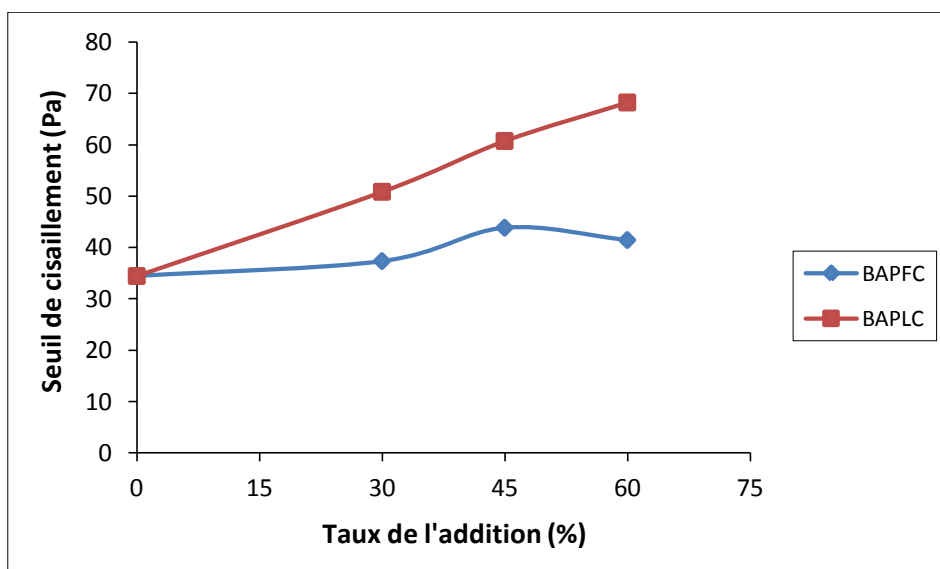


Figure 4.7. Influence des additions sur le seuil de cisaillement des BAP

La figure 4.8 montre une corrélation entre le seuil de cisaillement obtenu grâce à la boîte LCPC et l'étalement au cône d'Abrams des différents BAP.

La diminution des étalements est justifiée par une augmentation des seuils de cisaillement des mélanges, ce constat est validé par la bonne corrélation entre l'étalement et le seuil des BAP.

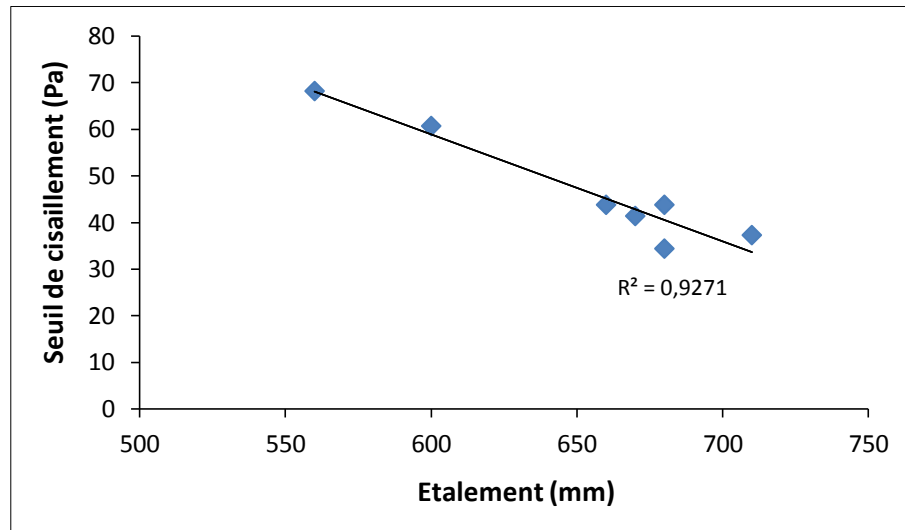


Figure 4.8. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC

3.6.2. Viscosité plastique

Sedran (Sedran, 99) a proposé un modèle de calcul de la viscosité plastique des BAP que nous avons utilisé pour exprimer la viscosité. L'équation utilisée est présentée dans le deuxième chapitre (équation 2.1) et les résultats des calculs sont présentés par la figure 4.9.

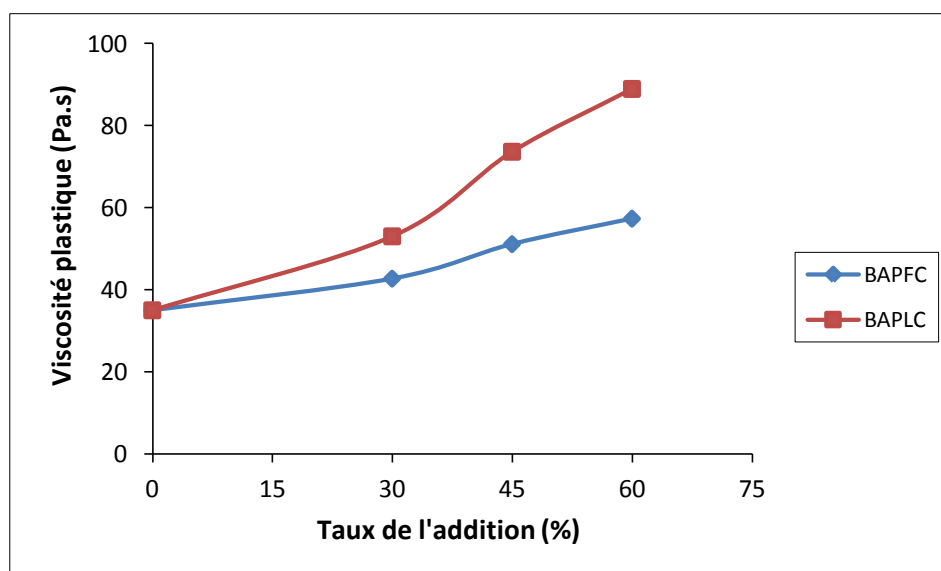


Figure 4.9. Influence des additions sur la viscosité plastique des BAP

L'introduction de filler calcaire et du laitier cristallisé entraîne une augmentation de la viscosité plastique des BAP pour des dosages de 30%, au-delà de ces dosages, la viscosité plastique des BAP LC augmente plus rapidement que celle des BAP FC (figure 4.9), ce qui rend le béton moins fluide « l'étalement diminue » suivi d'un temps d'écoulement plus élevé (T_{500} plus important).

Les résultats présentés sur la figure 4.10 montrent qu'il existe une bonne corrélation entre le temps d'écoulement et la viscosité plastique des BAP.

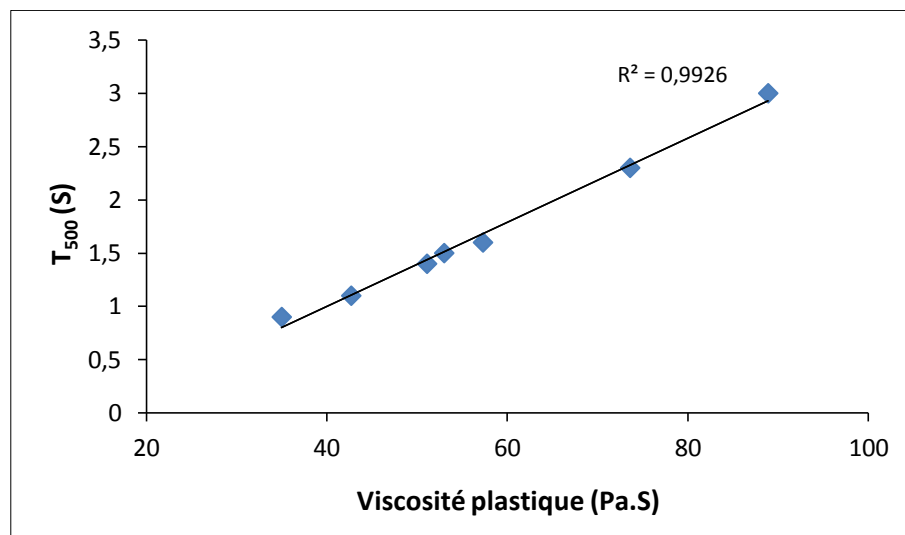


Figure 4.10. Relation entre la viscosité plastique et le temps T_{500}

On enregistre qu'un béton plus visqueux possède un temps T_{500} élevé. Les résultats de la viscosité confirment les résultats obtenus sur l'étalement, l'écoulement et le seuil de cisaillement.

Ainsi, on peut noter qu'un dosage de laitier cristallisé supérieur à 45% offre aux BAP des propriétés rhéologiques faibles et insuffisantes. Cependant, les BAP avec 30 et 45% de laitier cristallisé ont donné des résultats acceptables selon la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 10).

4. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAP À L'ÉTAT DURCI

4.1. Caractérisation mécanique des BAP

4.1.1. Résistance en compression

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence de deux additions de différente nature sur la résistance mécanique des BAP, pour cela, trois dosages différents ont été utilisés (30, 45 et 60% par rapport au poids du ciment) et ceci pour une durée de cure allant de 2 jours jusqu'à 90 jours.

Après 2 jours de durcissement, le BAP FC présente des résistances mécaniques plus élevées par rapport au BAP R et BAP LC (figure 4.11). Les fillers calcaires provoquent une accélération de la résistance mécanique aux jeunes âges (Pera *et al*, 99). L'effet physique (germination hétérogène) est beaucoup plus important en présence des FC que LC, ceci est dû essentiellement à la finesse du FC plus développée que celle du laitier cristallisé.

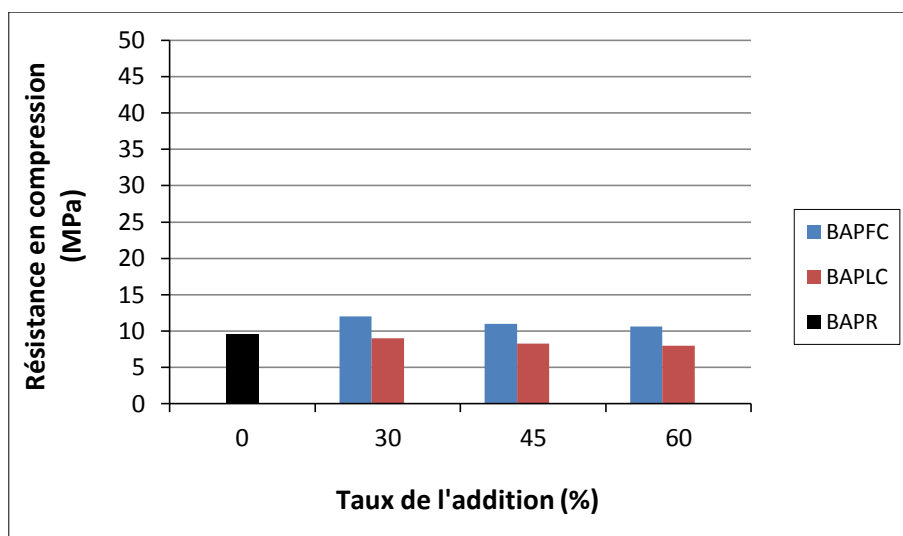


Figure 4.11. Influence des additions sur la résistance en compression à 2 jours de durcissement

A partir de 7 jours de durcissement (figure 4.12), les écarts des résistances mécaniques en compression entre BAPFC et BAPLC pour les dosages de 30 et 45 % sont réduits. Alors que le BAP LC 60 donne des résistances mécaniques supérieures à celles du BAPR.

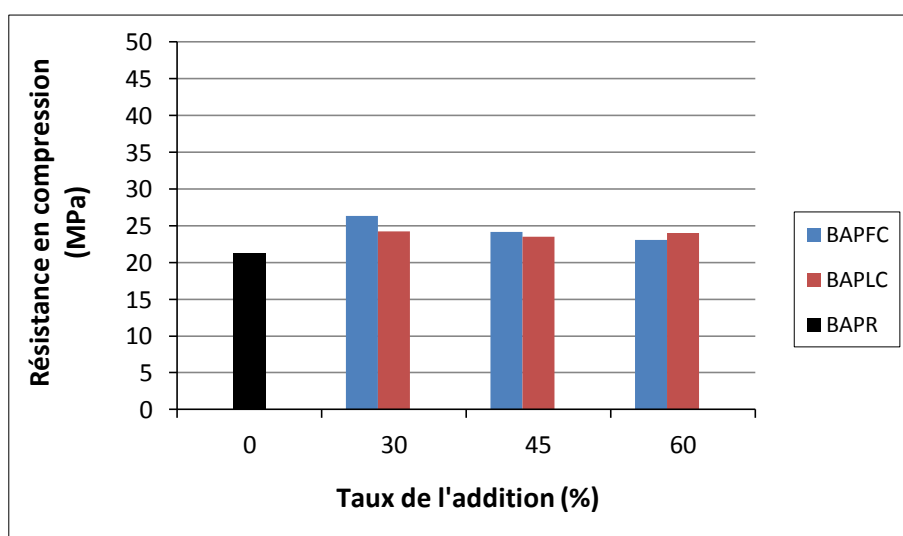


Figure 4.12 Influence des additions sur la résistance en compression à 7 jours de durcissement

Le filler calcaire est une addition chimiquement inerte et l'effet physique s'inscrit dans le court terme et s'estompe rapidement dans le temps, contrairement au laitier cristallisé qui

pourrait présenter une réactivité chimique potentielle justifiée par la bosse vitreuse (figure 2.7, Chapitre II) en raison de l'hétérogénéité du refroidissement (les couches au contact de l'air refroidissent rapidement), (Behim, 05).

D'après les résultats obtenus et présentés sur les figures 4.13 et 4.14, à moyen et long termes (28 et 90 jours) les BAPLC présentent les meilleures résistances en compression, surtout pour un dosage de 45 % (46 MPa après 90 jours de durcissement). Cette augmentation des résistances des BAPLC peut être expliquée par l'effet hydraulique potentiel du laitier cristallisé.

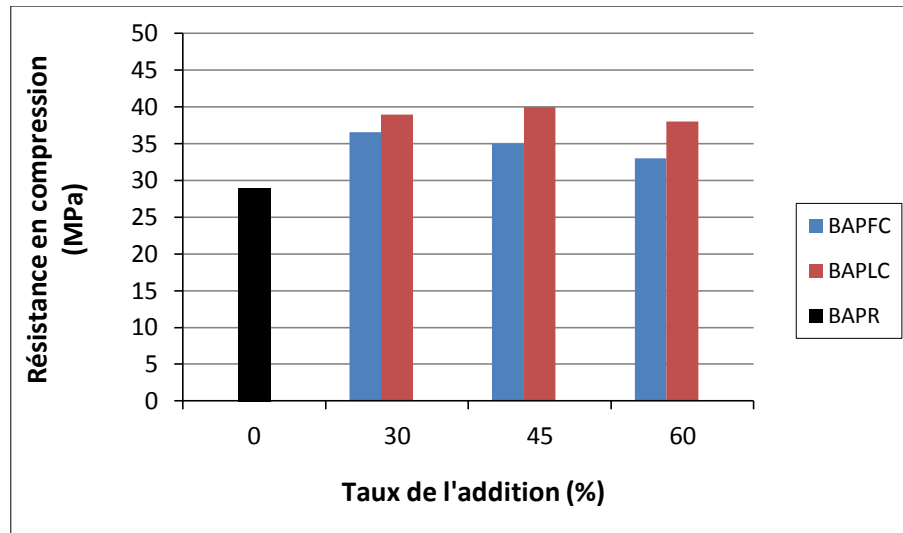


Figure 4.13. Influence des additions sur la résistance en compression à 28 jours de durcissement

Généralement le béton autoplaçant donne une résistance mécanique plus élevée qu'un béton ordinaire (Gibbs et Zhu, 99). L'ajout d'additions minérales provoque une diminution de la porosité de la matrice cimentaire (effet de remplissage) en progressant la résistance mécanique du béton au jeune âge par effet de remplissage et par effet physique.

A plus long terme, les résistances sont améliorées essentiellement par effet hydraulique ou pouzzolanique lorsqu'elles sont réactives (Behim, 05).

Les BAPFC et BAPLC donnent de meilleures résistances que le BAPR à tous les âges, en améliorant la compacité des bétons.

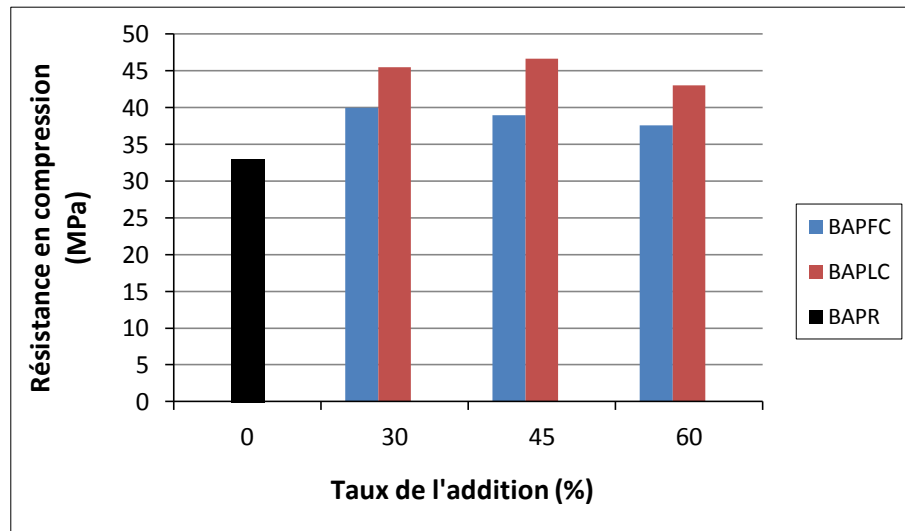


Figure 4.14. Influence des additions sur la résistance en compression à 90 jours de durcissement

Les additions améliorent aussi la résistance au jeune âge surtout le filler calcaire (FC) en raison de sa finesse élevée, par effet de germination hétérogène. L'addition minérale entraîne donc une meilleure hydratation du ciment par la formation de sites de nucléation dans lesquelles précipitent les hydrates (produit de l'hydratation du ciment), le développement des résistances se fait remarquer surtout à court terme (Behim, 05).

A long terme, l'accroissement des résistances du BAPFC commence à se stabiliser. On remarque aussi, qu'à 2 jours les BAPLC présentent des résistances mécaniques inférieures à celles des BAPFC, ce qui s'explique par la différence de la finesse entre les deux additions. En effet, la finesse Blaine du filler calcaire ($9900 \text{ cm}^2/\text{g}$) est supérieure à celle du laitier cristallisé ($6000 \text{ cm}^2/\text{g}$), alors il est logique que les fillers calcaires ont un effet plus marqué sur la résistance au jeune âge que le laitier cristallisé.

Cependant, à long terme le BAP LC présente de meilleures résistances que le BAP FC, ainsi l'amélioration des propriétés mécaniques en compression pour le BAP LC est due à une réactivité latente du laitier cristallisé, ce qui peut se traduire par une activité hydraulique catalysée dans le temps par l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment.

On peut alors déduire, à partir des résultats obtenus que l'amélioration des résistances dépende de la nature, du dosage et de la finesse de l'addition. Même si ce paramètre de finesse n'a pas été étudié, les finesses Blaine du FC ($9900 \text{ cm}^2/\text{gr}$) et celle du LC ($6000 \text{ cm}^2/\text{gr}$) sont assez différentes et peuvent expliquer les résultats obtenus sur les résistances mécaniques à court terme.

4.1.2. Cinétique de durcissement des BAP avec additions

4.1.2.1. BAP avec FC

Les résultats obtenus et présentés sur la figure 4.15 montrent que l'introduction du filler calcaire a un effet notable sur la cinétique de durcissement et les résistances mécaniques des bétons surtout pour un dosage de 30%.

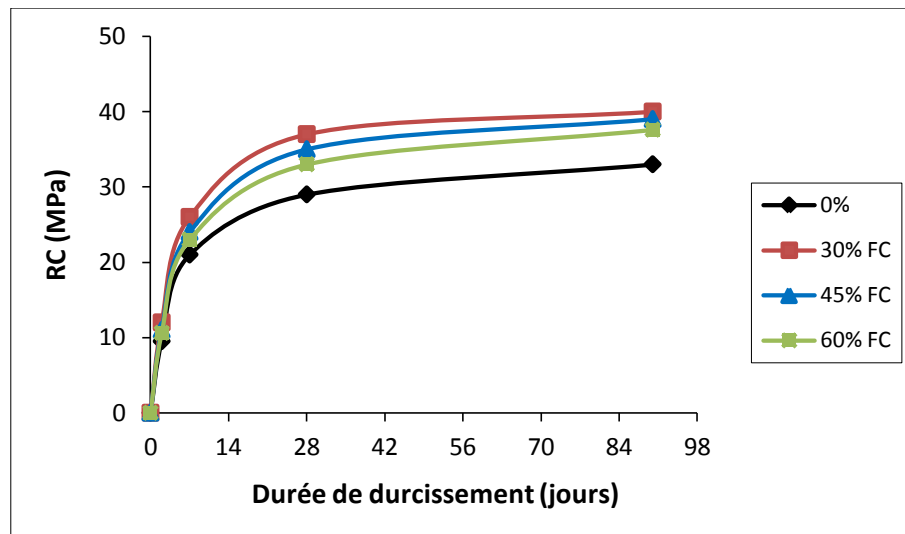


Figure 4.15. Cinétique de durcissement des BAP avec addition de filler calcaire

L'ajout d'additions minérales accélère la cinétique de durcissement pour tous les bétons surtout le filler calcaire qui accélère l'hydratation des BAP au jeune âge (Zhu et Gibbs, 05) mais, l'augmentation de son dosage n'a aucun effet sur l'évolution des résistances, on note plutôt, une légère diminution, pour un dosage supérieur à 30%.

4.1.2.2. BAP avec LC

Le laitier cristallisé améliore sensiblement les résistances mécaniques des BAP à moyen et long terme (figure 4.16).

Le dosage optimal pour les deux additions semble s'établir entre 30 et 45 %. En effet, les résultats obtenus sur la résistance mécanique montrent que le dosage idéal serait de 30%, confortant ainsi le choix du dosage optimal fixé en fonction des résultats obtenus par les essais sur BAP à l'état frais.

Le laitier cristallisé utilisé est peu réactif, donc sa cinétique de durcissement est lente (Behim, 05). Les résistances des BAPLC, obtenues au jeune âge sont inférieures à celles du BAPFC.

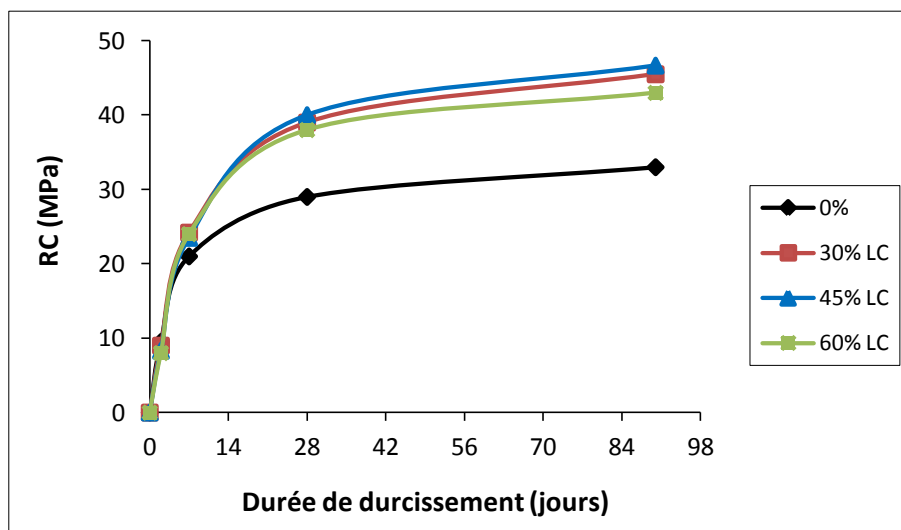


Figure 4.16. Cinétique de durcissement des BAP avec addition de laitier cristallisé

4.1.3. Étude comparative entre la résistance de FC et de LC

4.1.3.1. Pour un dosage de 30 %

La figure 4.17, montre qu'à 2 et 7 jours le BAPFC donne des résistances en compression légèrement supérieures à celles du BAPLC, mais à 28 et 90 jours le BAPLC rattrape et dépasse la résistance du BAPFC.

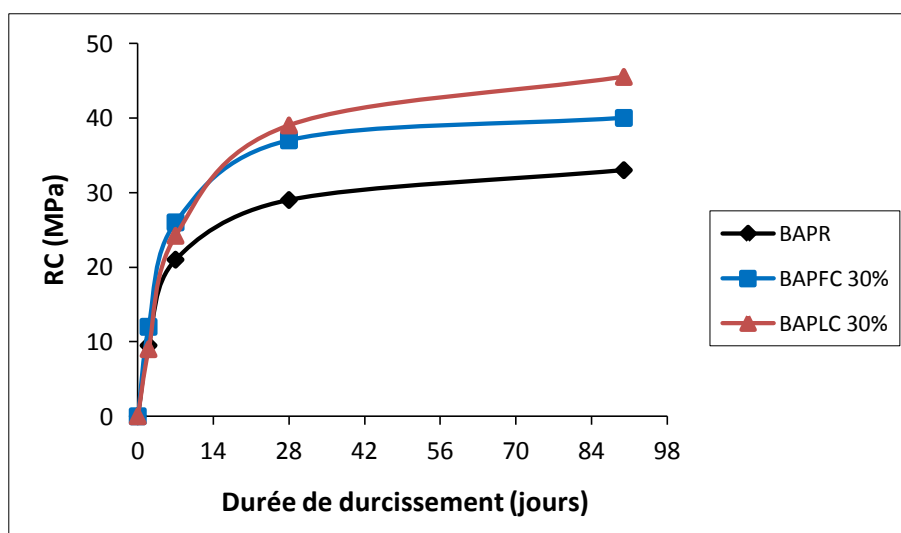


Figure 4.17. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 30 %

4.1.3.2. Pour un dosage de 45 %

En augmentant le dosage des additions à 45 %, les mêmes comportements sont observés qu'avec le dosage de 30% avec toutefois une légère perte de résistance pour les BAPFC et une amélioration de celles des BAPLC (figure 4.18).

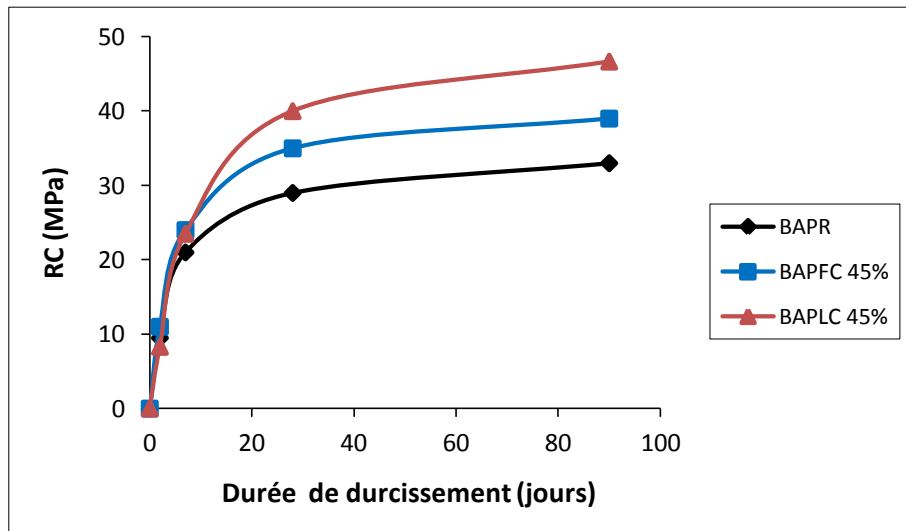


Figure 4.18. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 45 %

4.1.3.3. Pour un dosage de 60 %

L'augmentation du dosage des additions à 60% ne garantit pas les meilleurs résultats pour le filler calcaire. Les BAPLC ont les meilleures résistances par rapport aux BAPFC en particulier à moyen et long terme (figure 4.19).

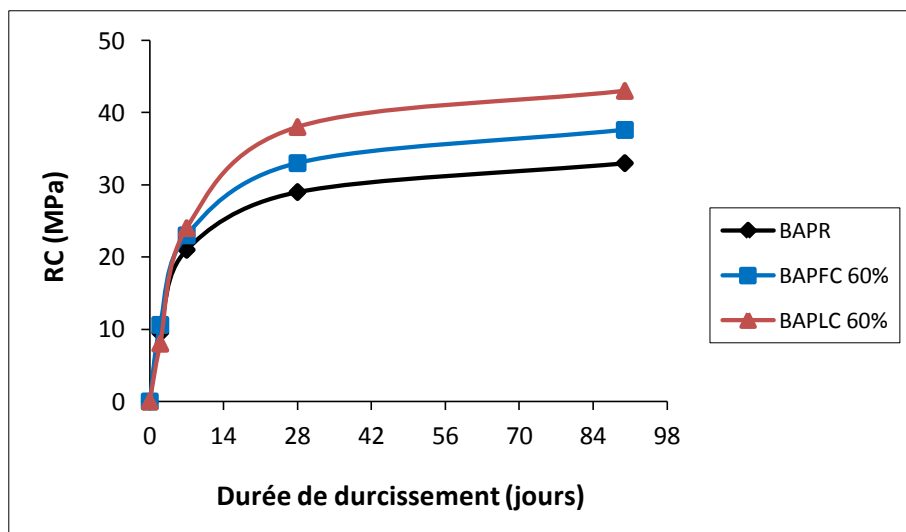


Figure 4.19. Cinétique de durcissement comparée des BAP avec addition de filler calcaire et laitier cristallisé pour un taux de 60 %

Les additions exercent un effet favorable sur la résistance en compression et cela pour tous les dosages. Les fines qui ont un effet hydraulique latent comme le laitier cristallisé assurent une augmentation de la résistance mécanique surtout à longue échéance.

L'influence du filler calcaire sur les performances mécaniques des BAP est remarquée à courte échéance. On peut noter que l'effet des additions est fonction de leurs dosages dont l'optimum semble s'établir à 30 et 45 %.

4.1.4. Résistance en traction par flexion

Dans cet essai, la durée de cure humide est de 28 jours. Les résultats obtenus et présentés sur la figure 4.20, ne montrent pas une amélioration significative des résistances en traction par flexion suite à l'emploi des additions.

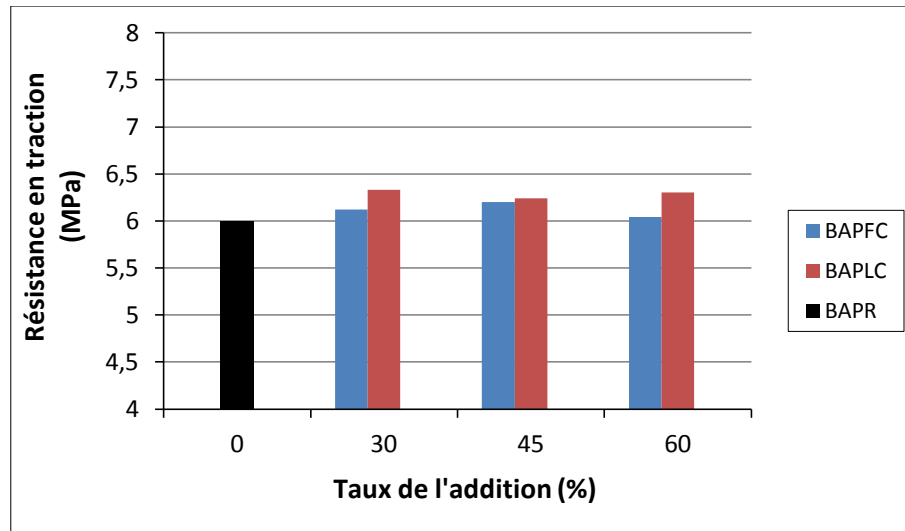


Figure 4.20. Influence des additions sur la résistance en traction par flexion à 28 jours de durcissement

4.1.5. Vérification de l'absence de ségrégation (observation visuelle)

La vérification de l'absence de ségrégation sur le béton frais est nécessaire, afin de garantir la bonne qualité du BAP qui se traduit par une bonne répartition des granulats, cependant la confirmer sur béton durci constitue une garantie de l'absence de ségrégation. A cet effet, nous avons préparé des éprouvettes cylindriques (11 x 22) cm démoulées 24 heures après coulage. Après 28 jours de conservation sous l'eau nous les avons retirées de l'eau et coupées dans le sens longitudinal. L'observation des sections, suivant le sens du coulage, nous renseigne sur la répartition des granulats dans l'éprouvette et donc sur la ségrégation.

4.1.5.1. Béton de référence

L'observation de la répartition granulaire du BAP R, montre une distribution homogène du squelette granulaire et une absence de ségrégation ce qui corrobore les résultats obtenus sur la stabilité au tamis (figure 4.21).



Figure 4.21. Observation de la répartition des granulats du BAPR

4.1.5.2. Béton avec addition de filler calcaire

Les BAP FC présentent une très bonne répartition granulaire, les gros granulats sont répartis sur toute la hauteur de l'éprouvette (figure 4.22), confirmant ainsi les résultats obtenus sur l'étalement et la boîte en L.



Figure 4.22. Observation de la répartition des granulats des BAPFC (30, 45 et 60%), présentés de gauche à droite

4.1.5.3. Béton avec addition de laitier cristallisé

Pour les BAP LC présentent une distribution homogène du squelette granulaire (figure 4.23).

Les gros granulats sont bien répartis dans la masse sur toute la hauteur de l'éprouvette, corroborant ainsi les résultats obtenus sur la stabilité au tamis.



Figure 4.23. Observation de la répartition des granulats des BAP LC (30, 45 et 60%), présentés de gauche à droite

5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

Les résultats obtenus dans cette étude, permettent de définir le dosage optimal pour chaque addition. Ainsi, un dosage de 30% d'additions améliore certaines propriétés d'ouvrabilité des BAP comme l'étalement, le taux de remplissage et la résistance à la ségrégation dynamique, mais au-delà de ce dosage, on enregistre une diminution des propriétés autoplaçantes des bétons. Les bétons formulés ont donné des paramètres d'autoplaçance acceptables selon la norme (NF EN 206-9, 10), excepté le BAPLC 60%. Pour cela, un dosage optimal de 30% d'addition sera utilisé pour étudier la durabilité des BAP.

Ce dosage unique constitue une facilité pratique dans la mesure où il nous a été difficile d'effectuer les essais de durabilité sur les BAP avec trois dosages d'addition, car la plupart des essais qui définissent les propriétés de transfert des bétons ont été réalisés au laboratoire matériau et durabilité des constructions (LMDC) de Toulouse. Ce qui a nécessité la mise en place d'une logistique pour le transport de matériaux et de différents échantillons d'Annaba vers Toulouse.

Le tableau 4.1 illustre une optimisation des résultats obtenus à l'état frais.

Tableau 4.1. Résultats des essais optimisés à l'état frais

Test	Unité	BAPFC	BAPLC
Étalement au cône	mm	710	660
T500	sec	1,1	1,5
Boite en L	-	0,92	0,85
Pourcentage de laitance	%	9,43	7,13
Boite LCPC	cm	78,8	70
Seuil de cisaillement	Pa	37	51
Viscosité plastique	Pa.s	42,7	53

5.1. Absorption capillaire

5.1.1. Perte de masse

La figure 4.24 présente les résultats de la perte de masse des BAP après un temps de cure de 28 jours. Les différentes éprouvettes ont été conservées dans une étuve à $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante. Le suivi de la masse est réalisé à intervalle de temps régulier, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,1% (AFREM, 97).

L'immersion des éprouvettes dans l'eau entraîne le remplissage des pores connectés avec le milieu extérieur. Les résultats, montrent que chaque BAP présente des pertes de masse différentes. Le BAP avec filler calcaire a une perte de masse presque semblable à celle du BAP de référence et plus importante que celle du BAP avec le laitier cristallisé, ce qui montre un volume de pores capillaires des BAP FC légèrement supérieur à celui des BAPLC, due probablement à la nature du laitier cristallisé (pouvoir hydraulique latent).

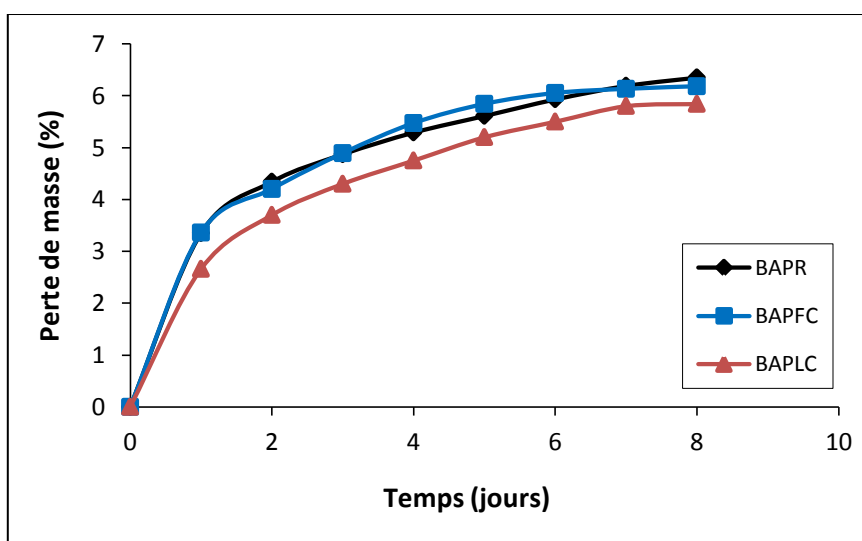


Figure 4.24. Perte de masse des échantillons due à leur séchage

5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des BAP par capillarité sont présentés par la figure 4.25.

La capacité d'absorption d'eau est influencée par le réseau poreux du matériau. La figure 4.25, montre que le coefficient d'absorption des BAP augmente avec le temps. Plus les diamètres des pores augmentent, plus le coefficient d'absorption est élevé (Bessa, 04).

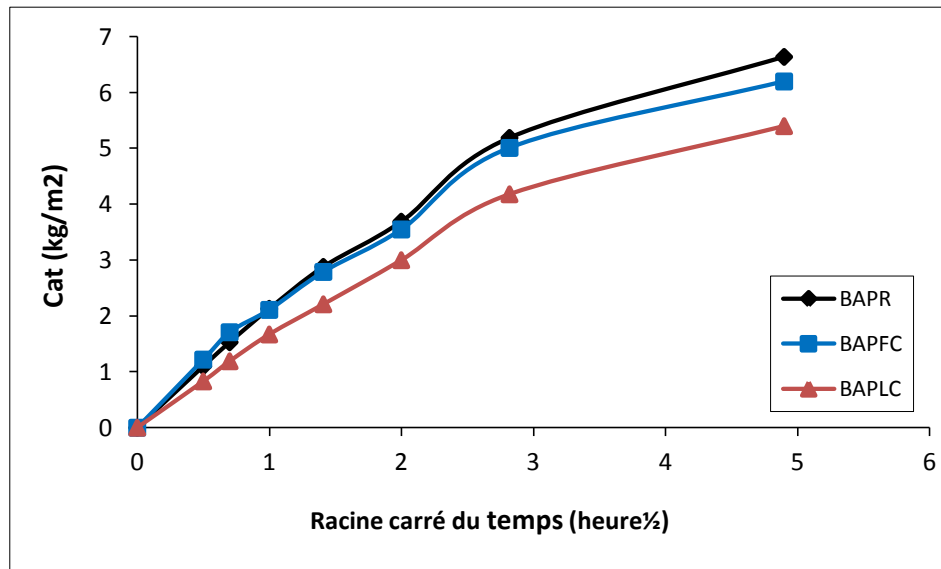


Figure 4.25. Coefficient d'absorption d'eau des échantillons

Le BAPLC donne des coefficients d'absorptions plus faibles aux différentes échéances que ceux du BAP FC.

A la fin de l'essai, nous avons constaté que la surface supérieure des éprouvettes était sèche après une durée de 24 heures, ce qui prouve que la remontée d'eau capillaire n'a pas atteint toute la hauteur de l'éprouvette et on peut ainsi dire qu'une durée de 24 heures n'est peut être pas suffisante pour obtenir une remontée capillaire complète (Ali Boucetta, 14).

D'après, Bessa (Bessa, 04), il existe plusieurs familles de pores. Ainsi, lorsque la remontée capillaire est achevée dans les gros pores capillaires après un certain temps, le phénomène d'absorption se poursuit dans les pores plus fins.

5.2. Porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité accessible à l'eau a été effectué après une durée de cure de 28 jours (AFREM, 97). La figure 4.26 présente les résultats obtenus sur la porosité ouverte des bétons.

Les additions minérales diminuent la porosité des mélanges. Cependant le BAP à base de laitier cristallisé présente une porosité plus faible que le BAP à base de filler calcaire, ceci est dû probablement aux natures différentes des deux additions. Le filler calcaire est une addition inerte et son effet est circonscrit à court terme grâce à l'effet de surface, alors que le laitier cristallisé pourrait avoir un pouvoir hydraulique qui s'inscrit dans le long terme par l'amélioration de la compacité du BAP.

Les résultats de la porosité accessible à l'eau corroborent les résultats obtenus sur la résistance en compression (Assié, 04), puisque à 28 jours, les BAPLC présentent les meilleures résistances mécaniques.

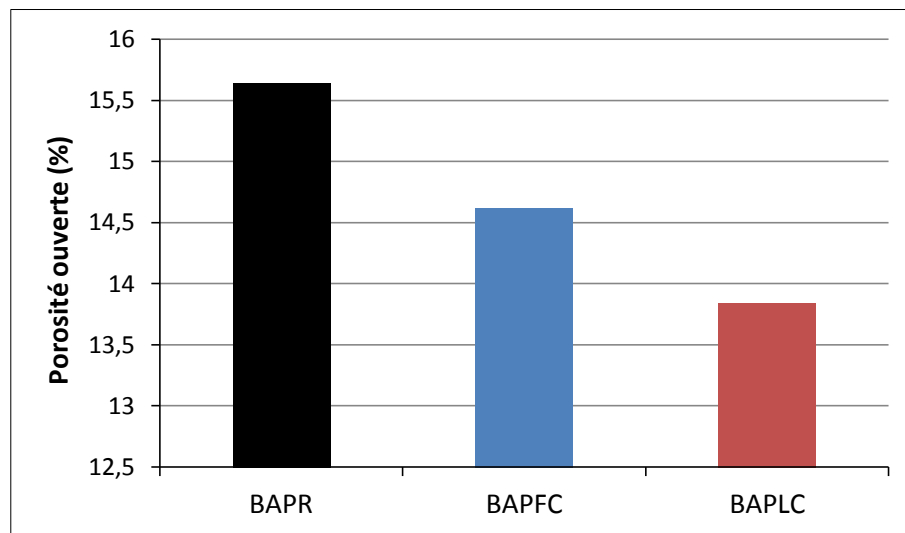


Figure 4.26. Porosité ouverte des BAP

On peut ainsi noter que les additions minérales ont un effet favorable sur les bétons qui se traduit par l'amélioration de la compacité due à deux effets qui se conjuguent dans le temps que sont l'effet de remplissage des deux additions d'une part et l'effet hydraulique d'autre part du laitier cristallisé en raison de sa réactivité latente.

5.3. Carbonatation accélérée

L'essai de carbonatation accélérée a été réalisé conformément à la méthode proposée par l'AFREM (AFREM, 97).

5.3.1. Suivi de masse

Le suivi de masse et les mesures des profondeurs carbonatées ont été réalisés en même temps, la figure 4.27 présente les résultats obtenus sur la masse des échantillons.

Après quelques jours de conservation dans l'enceinte de carbonatation, on enregistre une augmentation de la masse des éprouvettes résultant de la mise en équilibre hygrométrique des échantillons.

La figure 4.27 montre qu'après 7 jours de conservation (durée de mise en équilibre hygrométrique des éprouvettes dans l'enceinte de carbonatation accélérée), les masses continuent d'augmenter par effet de carbonatation. Les BAPFC et BAPR ont des masses supérieures à celles du BAPLC. Alors que la masse du BAP à base de laitier cristallisé augmente aussi mais de façon moindre et se caractérise par une meilleure compacité que les autres BAP.

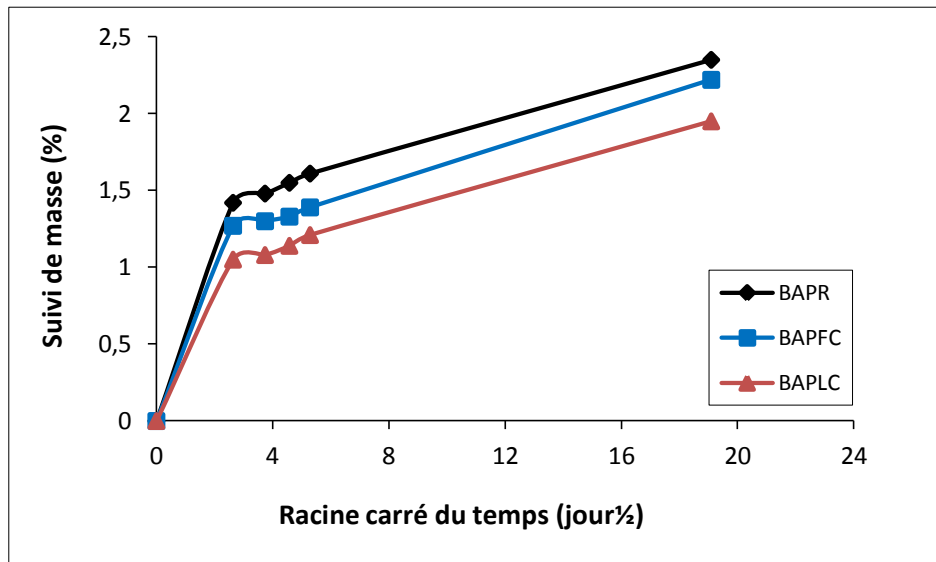


Figure 4.27. Variation de la masse des BAP due à la carbonatation

5.3.2. Profondeur carbonatée

Après le sciage des éprouvettes, les profondeurs carbonatées ont été mesurées par une pulvérisation de la phénolphthaléine à des échéances de 7, 14, 21, 28 et 365 jours, après une durée de cure humide de 28 jours à une température de 20°C.

Les BAP à base du filler calcaire et de laitier cristallisé présentent des signes de carbonatation moins importants que celles des BAP de référence. La figure 4.28 montre les résultats de l'ensemble des BAP.

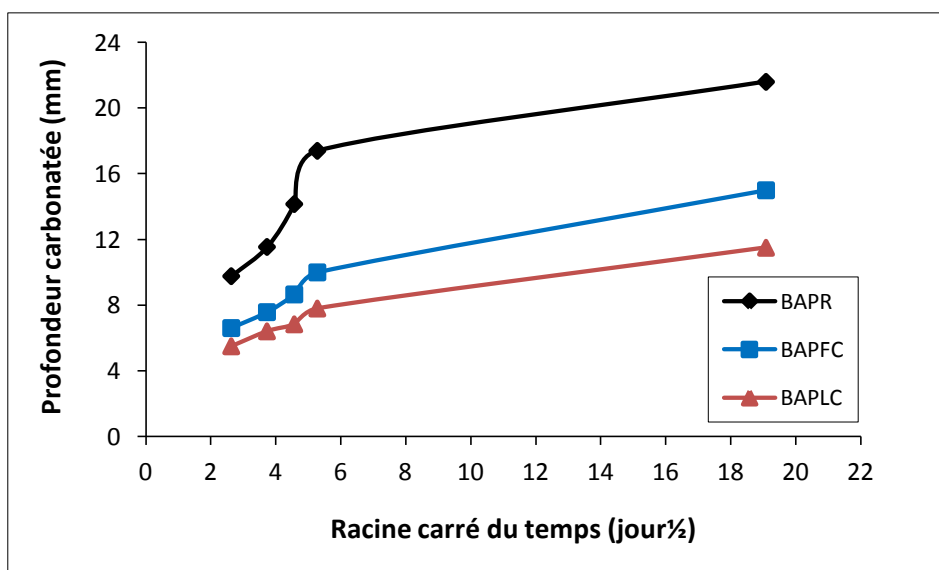


Figure 4.28. Profondeur dégradée des BAP due à la carbonatation

Les additions minérales sont ajoutées dans les mélanges avec des masses constantes de ciment. Ces additions sont de natures différentes qui améliorent la compacité des bétons.

Après quelques jours d'exposition, le BAPR (sans addition) donne des profondeurs carbonatées supérieures à celles des BAP à base de filler calcaire et de laitier cristallisé.

Après 365 jours d'exposition, la carbonatation du BAPR est presque totale (21,6 mm) par rapport aux BAP à base d'addition. Ainsi, le BAPLC présente des profondeurs carbonatées (11 mm) inférieures à celles du BAPFC (15 mm), corroborant ainsi les résultats obtenus sur l'absorption d'eau.

La plupart des recherches (Shi *et al*, 09 ; Behim *et al*, 11) qui ont été réalisées sur la carbonatation des bétons avec additions ont montré que la résistance à la carbonatation est plus faible lorsque le taux de remplacement du ciment par des additions est plus élevé et dans notre travail, il ne s'agit pas de substitution mais d'addition.

Le BAPLC se caractérise par une bonne résistance à la carbonatation à toutes les échéances. Donc, le laitier cristallisé comme addition au BAP contribue à améliorer la compacité et par conséquent la durabilité des bétons.

6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de deux additions de différente nature sur l'ouvrabilité, la résistance mécaniques et la durabilité des BAP.

L'objectif de cette partie de travail consiste à faire une comparaison entre une addition peu utilisée (laitier cristallisé) et une addition traditionnellement utilisée pour la fabrication des BAP (filler calcaire). Pour chaque addition, on a choisi d'utiliser trois différents dosages (30, 45 et 60% par rapport au poids du ciment).

D'après les résultats obtenus, on a pu tirer les enseignements suivants :

Un béton autoplaçant se caractérise par une grande fluidité mais aussi par une stabilité (absence de ressuage et de ségrégation) et un pourvoir de remplissage correct des coffrages.

Il est possible d'obtenir un béton qui se caractérise par une grande fluidité par le seul emploi de superplastifiant mais dépourvus de caractère autoplaçant notamment la stabilité statique, dynamique et le pouvoir de remplissage.

L'emploi des additions dans les bétons s'inscrit dans cette logique à communiquer aux bétons les facteurs d'autoplaçance tout en maintenant une bonne fluidité.

En effet l'emploi des additions a permis de communiquer aux bétons le caractère autoplaçant en termes d'étalement, de stabilité, de pouvoir de remplissage, de viscosité et de seuil de cisaillement.

Cependant les effets des additions sont différents en fonction de leur nature et de leur dosage (Zhang et Han, 00). Le laitier cristallisé a une demande en eau importante par rapport au filler calcaire (Cyr, 03) ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton. En effet, des mesures de consistance normale à l'aide de la sonde de Vicat, réalisées sur des pâtes pures de filler calcaire et de laitier cristallisé ont donné des rapports (eau/pâte) respectivement $E/FC = 0.23$ et $E/LC = 0.25$.

Nous avons mis en évidence l'influence des additions sur l'étalement pour un même dosage (30%), le laitier cristallisé entraîne une perte de fluidité (étalement et écoulement) alors que le filler calcaire améliore l'étalement par rapport à un béton de référence sans addition.

Le pouvoir de remplissage (L-Box test) est ramené à des valeurs supérieures à celles préconisées par les normes. Alors que le béton de référence ne satisfait pas ce paramètre et ne peut être classé comme BAP.

Les additions finement broyées occupent et 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, 05), ce qui se traduit par l'amélioration de la stabilité et de l'homogénéité (empêchent la ségrégation par l'augmentation du volume et de la viscosité de la pâte).

Mais, au delà d'un dosage critique, les paramètres d'autoplaçance se dégradent, notamment la stabilité au tamis et la viscosité. L'augmentation de la concentration en solide, en particulier le laitier cristallisé, dans le mortier, entraîne sa robustesse se traduisant par une perte de stabilité et de viscosité et l'augmentation du seuil de cisaillement. La viscosité du mortier évolue vers des valeurs importantes qui empêchent le BAP de s'écouler et de remplir les coffrages correctement, on observera alors une mauvaise qualité de parement (Cussigh et De Schutter, 03).

Pour éviter les risques de ségrégation et garantir la fluidité et la mobilité d'un BAP, la valeur du seuil de cisaillement doit être inférieure à 200 Pa (Wallevik, 03), ce qui a été largement satisfait par les résultats obtenus avec différents dosages d'additions.

Ainsi, on peut noter qu'un dosage de laitier cristallisé de l'ordre de 30% offre aux BAP des propriétés rhéologiques optimales et satisfait les valeurs préconisées par la norme NF EN 206-9 (NF EN 206-9, 10). Le béton à base de laitier cristallisé présente des performances mécaniques remarquables et une bonne résistance aux attaques externes (diffusion du CO_2 et la pénétration de l'eau qui peut contenir des ions agressifs). Ces avantages nous encouragent à valoriser et recycler ce type de déchet dans le domaine des BAP, puisque le complexe sidérurgique d'Annaba dispose d'un stock important de ce matériau.

CHAPITRE V

EFFET DES FIBRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

CHAPITRE V

EFFET DES FIBRES SUR LES PROPRIÉTÉS DES BAP

Sommaire

1. INTRODUCTION	111
2. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS	111
2.1. Etalement au cône d'Abrams.....	111
2.2. Temps T_{500}	112
2.3. Écoulement à la boîte LCPC.....	113
2.4. Taux de remplissage dans la boîte en L.....	114
2.5. Stabilité au tamis.....	115
2.6. Air occlus.....	116
2.7. Propriétés rhéologiques.....	117
2.7.1. Seuil de cisaillement.....	117
2.7.2. Viscosité plastique.....	119
3. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT DURCI	121
3.1. Caractérisation mécanique des BAP fibrés.....	121
3.1.1. Résistance en compression.....	121
3.1.2. Étude comparative sur la résistance en compression des BAP fibrés.....	123
3.1.3. Résistance en traction par flexion.....	125
3.1.4. Étude comparative sur la résistance en traction par flexion des BAP fibrés.....	126
3.1.5. Exploitation des résultats obtenus (ouvrabilité et résistance mécanique).....	128
3.1.6. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures.....	129
4. RETRAIT EMPÊCHÉ	132
5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT	134
5.1. Absorption capillaire.....	134
5.1.1. Perte de masse.....	134
5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire.....	135
5.2. Porosité accessible à l'eau.....	137
5.3. Carbonatation accélérée.....	138
5.3.1. Suivi de masse.....	138
5.3.2. Profondeur carbonatée.....	139
6. CONCLUSION	140

Chapitre V

Effet des fibres sur les propriétés des BAP

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, les BAP sont très utilisés dans le domaine du génie civil. Ces bétons fluides présentent des propriétés mécaniques et physiques semblables à celles des bétons traditionnels.

Dans ce chapitre, nous réaliserons une comparaison entre des BAP sans fibre (BAPFC / BAPLC) et des BAP fibrés (BAPFP - polypropylène / BAPFD - Diss). Dans un premier temps, nous avons réalisé des essais de compression et de traction par flexion sur des mortiers renforcés par les fibres de diss avec trois longueurs différentes (12, 20 et 30 mm) et les résultats obtenus et donnés en annexe A, ont permis de mettre en évidence que les plus efficaces étaient celles qui avaient une longueur de 12 mm de même longueur que celle que la fibre de PP proposé par le fabricant (Annexe B).

L'objectif de cette partie de travail porte sur l'étude de l'influence des fibres de diss sur les caractéristiques des BAP à l'état frais (étalement, T_{500} , taux de remplissage, stabilité au tamis, air occlus, viscosité et seuil de cisaillement) ainsi qu'à l'état durci (compression, traction par flexion, mesure de la flèche, de l'ouverture des fissures, de retrait empêché et l'étude de la durabilité par des essais accélérés). Ces propriétés seront comparées à celles d'un béton renforcé par des fibres de polypropylènes (BAPFP) et qui servira ainsi de matériau témoin.

L'exposé des résultats permettra de mettre en évidence l'effet de l'incorporation des fibres de diss sur les propriétés des bétons afin de montrer l'intérêt de la valorisation des fibres végétales dans le domaine des BAP.

2. RÉSULTATS OBTENUS À L'ÉTAT FRAIS

2.1. Etalement au cône d'Abrams

La figure 5.1, montre que tous les BAP présentent des résultats conformes aux normes (NF EN 12350 – 8, 10) puisque l'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre (550 et 850 mm).

L'introduction des fibres de polypropylène (PP) ou de diss dans les BAP entraîne une diminution de l'étalement qui s'accroît avec l'augmentation du taux de fibres (El Hilali, 09), ce qui indique que l'étalement est gêné par les fibres (Grunewald et Walraven, 01). L'effet des fibres de diss est légèrement moins important que celui des fibres de PP sur l'étalement, car d'une part les fibres de diss sont introduites dans le BAP à l'état saturé d'eau et d'autre part le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss par unité de volume. On note aussi que les fibres de polypropylène nécessitent une quantité d'eau pour le mouillage même

si celles-ci n'absorbent pas d'eau, cependant une quantité d'eau de gâchage sera adsorbée à la surface des fibres.

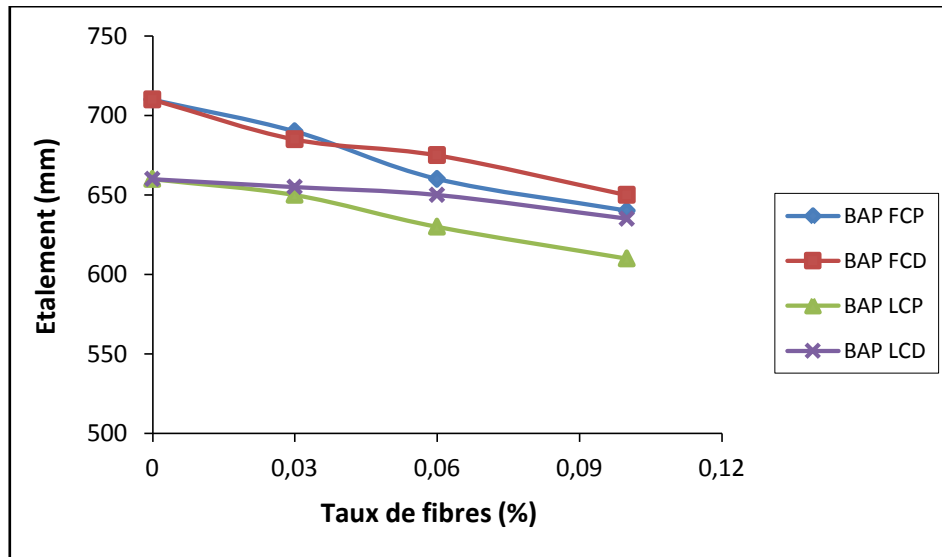


Figure 5.1. Influence des fibres sur l'étalement des BAP

2.2. Temps T_{500}

Le temps T_{500} est mesuré à l'aide du cône d'Abrams qui mesure le temps de passage de la galette de béton à un diamètre de 500 mm.

La figure 5.2 montre que les BAP fibrés ont un temps d'étalement supérieur à celui des BAP sans fibre. Les BAP renforcés par les fibres de PP présentent des T_{500} importants (supérieurs à 2 sec) selon la norme (NF EN 206-9, 10). Cependant, le BAP avec fibres de diss donne des temps d'étalement modérés, surtout pour les BAP à base de filler calcaire qui offre une mise en œuvre plus rapide que les BAP fibrés avec addition de laitier cristallisé.

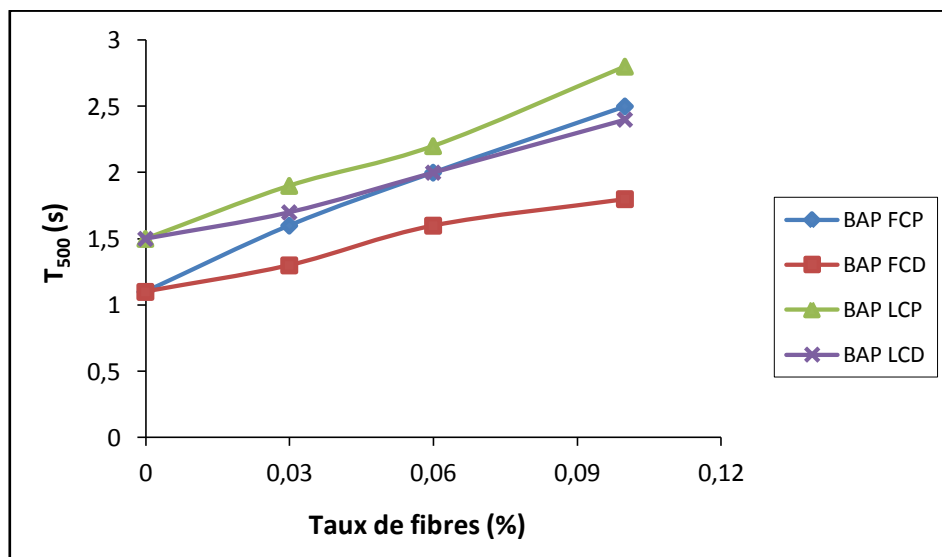


Figure 5.2. Influence des fibres sur le T_{500} des BAP

Les fibres forment un obstacle pour la mobilité des BAP à l'état frais, ce qui entraîne une diminution de la vitesse d'écoulement des mélanges, ce comportement s'accroît avec l'augmentation du dosage en fibre et en particulier pour les fibres de polypropylène dont le nombre par unité de volume est supérieur à celui des fibres de Diss.

2.3. Écoulement à la boîte LCPC

Les résultats de la figure 5.3 montrent que l'augmentation du taux de fibres entraîne une diminution de la longueur d'écoulement. Cette diminution est beaucoup plus marquée pour les BAP fibrés avec addition du FC. Cependant, les BAP fibrés avec addition du LC diminuent légèrement la longueur d'écoulement notamment pour un taux de fibres de 0,03%.

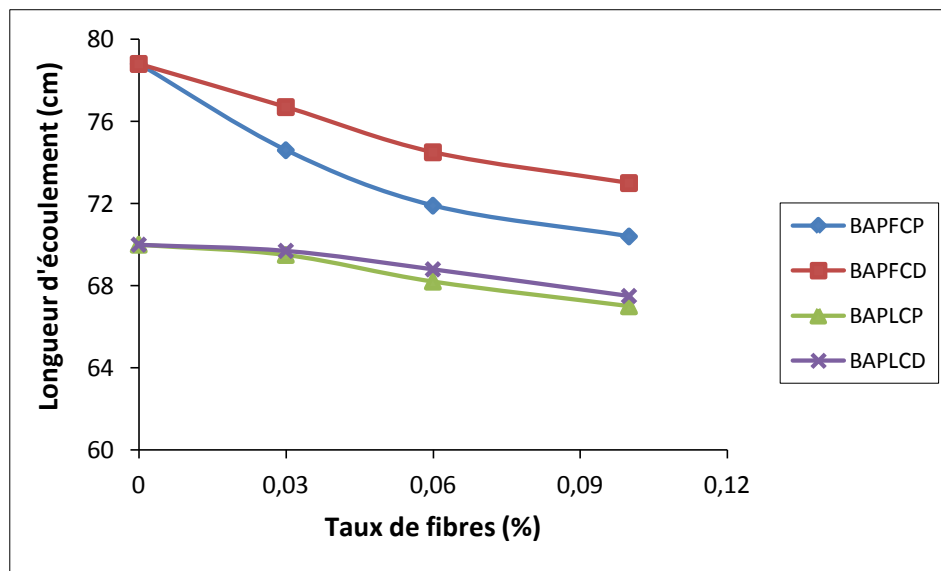


Figure 5.3. Influence des fibres sur la longueur d'écoulement des BAP

Les résultats obtenus et montrés sur les deux figures 5.4 et 5.5, montrent que les BAP renforcés par les fibres de PP et de diss présentent une bonne corrélation entre l'essai de la boîte LCPC et le cône d'Abrams.

Les fibres réduisent l'étalement et la longueur d'écoulement notamment les fibres de PP. La fibre de diss offre une meilleure ouvrabilité que la fibre synthétique parce qu'elle est utilisée à l'état saturé d'eau et d'autre part le nombre de fibres par unité de volume est inférieur à celui des fibres de PP.

On note aussi que les résultats de l'étalement corroborent ceux obtenus sur la longueur d'écoulement, validée par une corrélation présentée par les figures 5.4 et 5.5.

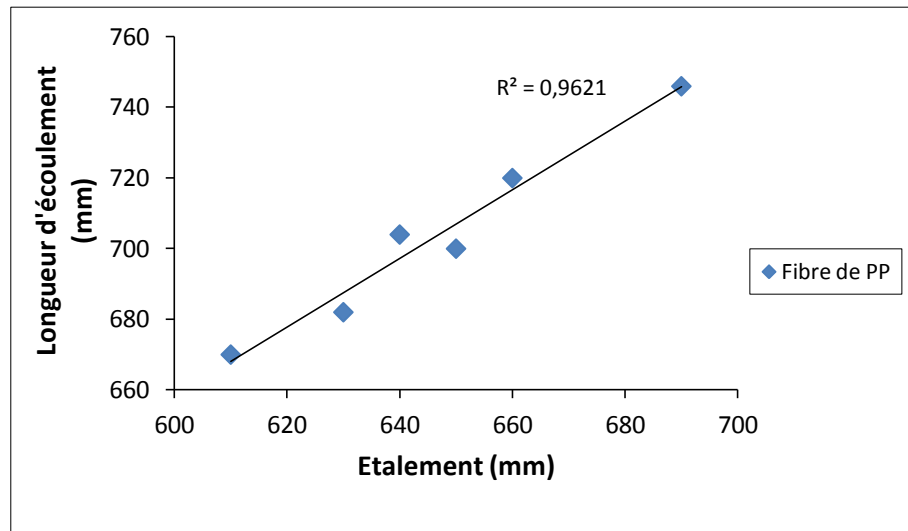


Figure 5.4. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams pour les BAP avec fibres de PP

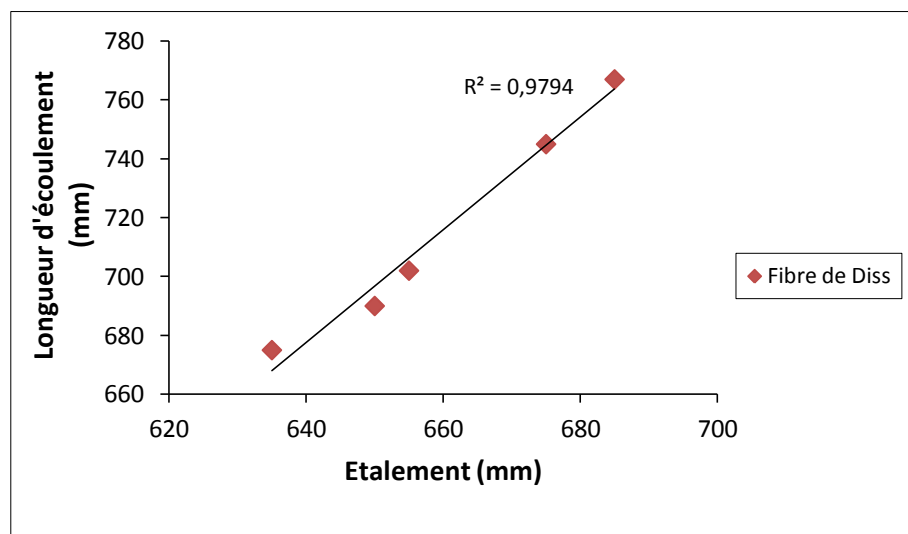


Figure 5.5. Relation entre la longueur d'écoulement et l'étalement au cône d'Abrams pour les BAP avec fibres de diss

2.4. Taux de remplissage dans la boîte en L

Selon la norme (NF EN 12350 – 8, 10), la valeur du taux de remplissage doit être ($H_2/H_1 \geq 0,8$). L'introduction des fibres dans les BAP conduit à une diminution du taux de remplissage (figure 5.6).

L'augmentation du taux de fibres a provoqué une diminution de la mobilité du béton en milieu confiné. Cette diminution est fonction du taux et de la nature des fibres utilisées. Ainsi, les BAP avec addition de FC et renforcés de fibre de PP ou de diss satisfont le critère préconisé par la norme pour tous les dosages en fibres et présentent un bon comportement en milieu confiné. Cependant, les BAP avec addition de LC et renforcés de fibres de PP ou de

diss, ont des taux de remplissage inférieur à 0.8 pour des dosages en fibres supérieurs à 0,06%, donc au-delà de ce dosage, le béton présente des signes de blocage, ce qui explique qu'un dosage élevé en fibre empêche le béton de bien s'écouler à travers les barres d'armatures.

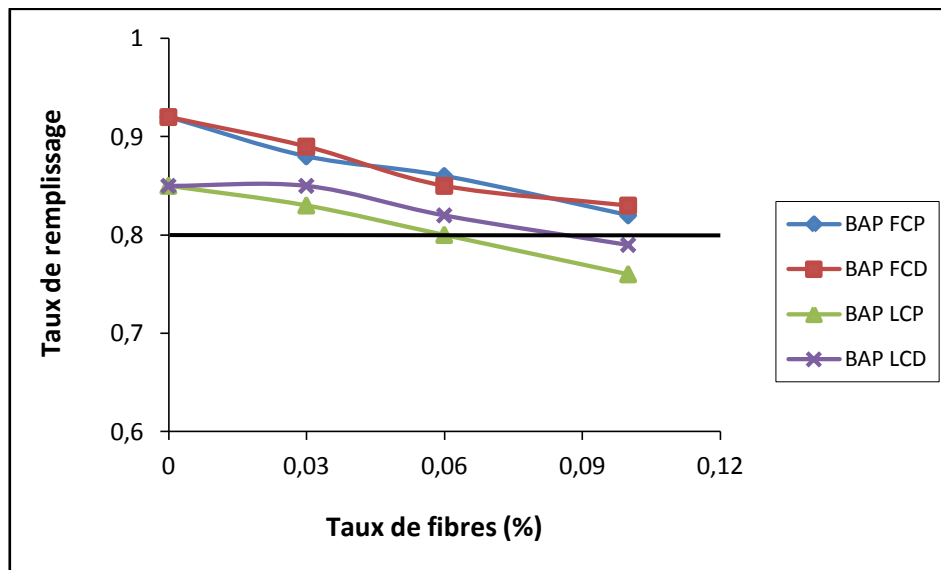


Figure 5.6. Influence des fibres sur le taux de remplissage des BAP

Les résultats obtenus montrent que le taux optimal de fibres est de 0,06%. Un dosage de fibre de 0,1% entraîne une mauvaise résistance à la ségrégation dynamique, cela est remarqué pour les BAP avec addition du laitier cristallisé.

2.5. Stabilité au tamis

Les résultats obtenus par l'essai de stabilité au tamis et présentés sur la figure 5.7 confirment que tous les BAP fibrés donnent une valeur conforme aux recommandations de la norme (NF EN12350 – 8, 10).

L'incorporation des fibres entraîne la diminution de la laitance des BAP, ce qui se traduit par une légère amélioration de la résistance à la ségrégation statique.

La diminution de la quantité de laitance est surtout notable par l'introduction des fibres de PP en quantité importante, la stabilité au tamis passe en dessous de 5%, avec un dosage de 900 g/m^3 se traduisant par une résistance à la ségrégation plus importante du matériau. Le béton devient alors trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis, ce qui aura pour conséquence une difficulté d'écoulement et donc de remplissage des coffrages. Les résultats présentés sur la stabilité corroborent les résultats obtenus sur l'étalement.

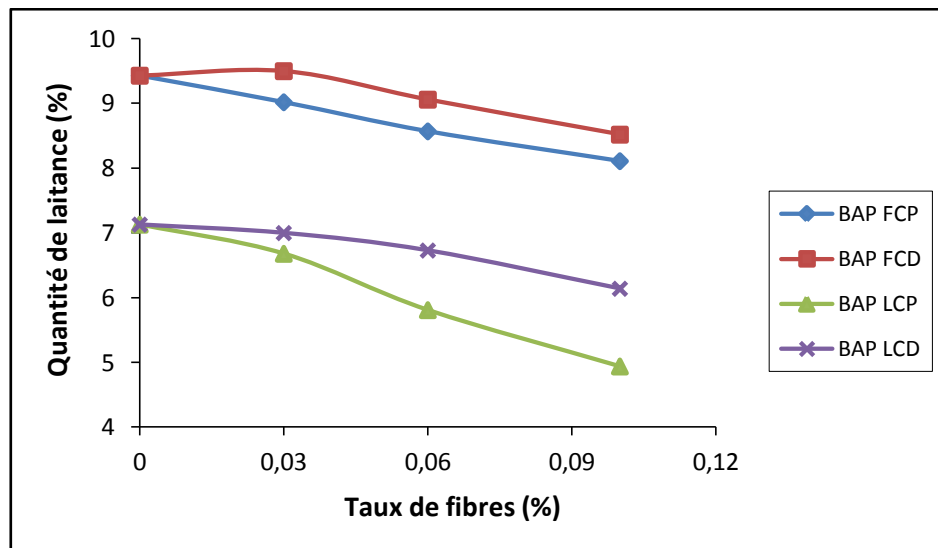
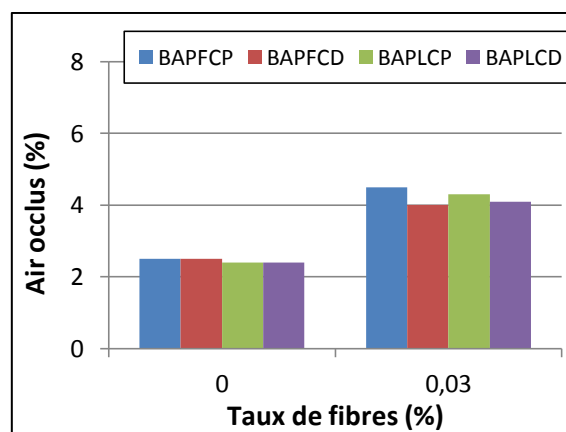


Figure 5.7. Influence des fibres sur la stabilité au tamis des BAP

D'autres hypothèses pourraient être avancées, en effet la longueur des fibres est de 12 mm, cette longueur est supérieure au diamètre de la maille du tamis (5 mm), la fibre pourrait former un obstacle pour l'écoulement de la laitance à travers le tamis, ajouter à cela qu'une partie de l'eau est adsorbée par les fibres de polypropylène pour leur mouillage. Il est probable que l'ensemble de ces facteurs contribuent à expliquer la diminution de la quantité de laitance.

2.6. Air occlus

La quantité d'air occlus des BAP fibrés est présentée par la figure 5.8. Dans cet essai, on a réalisé une comparaison entre les BAP sans fibres et des BAP renforcés par des fibres. L'incorporation des fibres dans le béton augmente la teneur en air occlus qui s'accroît avec l'augmentation de leur dosage, rendant le béton plus poreux.



a – 0,03%

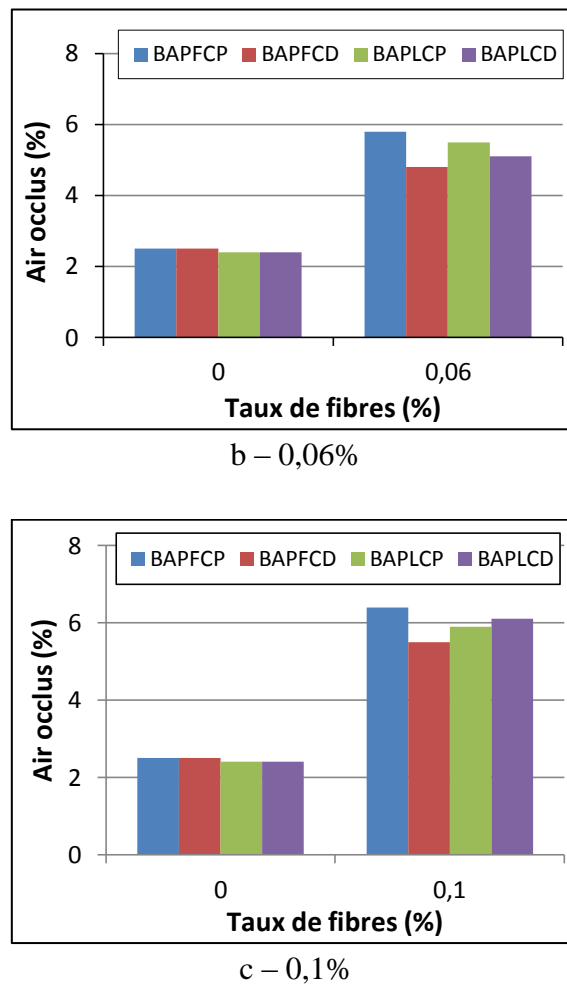


Figure 5.8. Influence des fibres sur la teneur en air des BAP

Les BAP renforcés par des fibres de PP ont un pourcentage d'air occlus supérieur à celui des BAP avec fibre de diss. Cette différence est due vraisemblablement au nombre de fibres de PP qui est supérieur à celui des fibres de diss.

2.7. Propriétés rhéologiques

2.7.1. Seuil de cisaillement

Les résultats présentés sur la figure 5.9, montre que l'ajout des fibres entraine une augmentation du seuil de cisaillement des BAP qui a tendance à augmenter avec l'augmentation du dosage en fibres, quelle que soit la nature de la fibre.

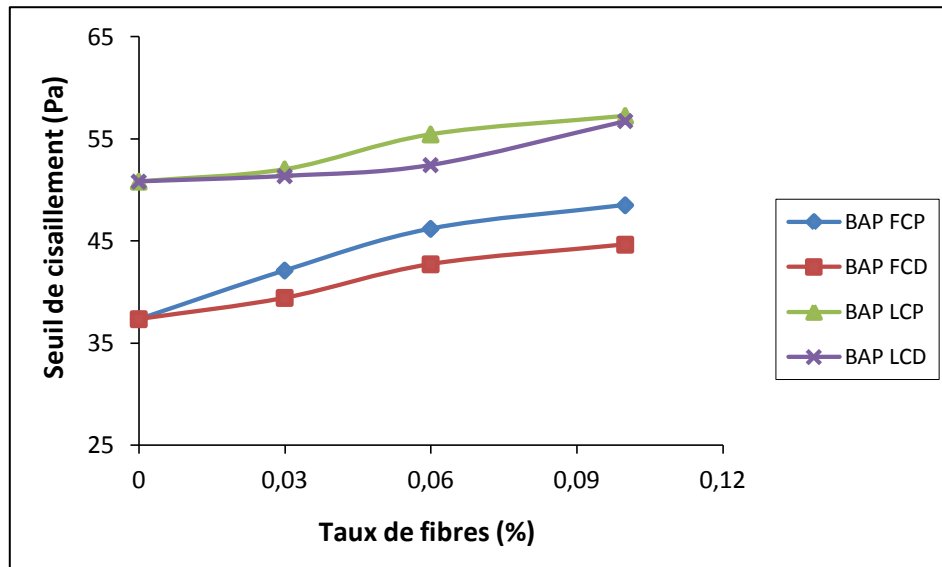


Figure 5.9. Influence des fibres sur le seuil de cisaillement des BAP

Il existe une relation entre le seuil de cisaillement (boite LCPC) et l'étalement (cône d'Abrams) des bétons présentée sur les figures 5.10 et 5.11.

Les fibres diminuent l'étalement des BAP, en augmentant ainsi le seuil de cisaillement, ce qui se traduit par une bonne corrélation entre les deux paramètres (étalement et seuil de cisaillement) pour les deux types de fibres.

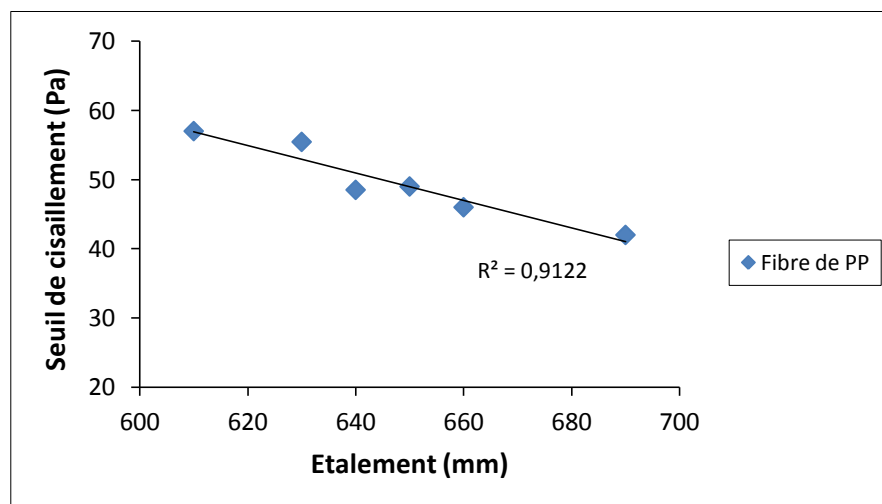


Figure 5.10. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC pour les BAP avec fibres de PP

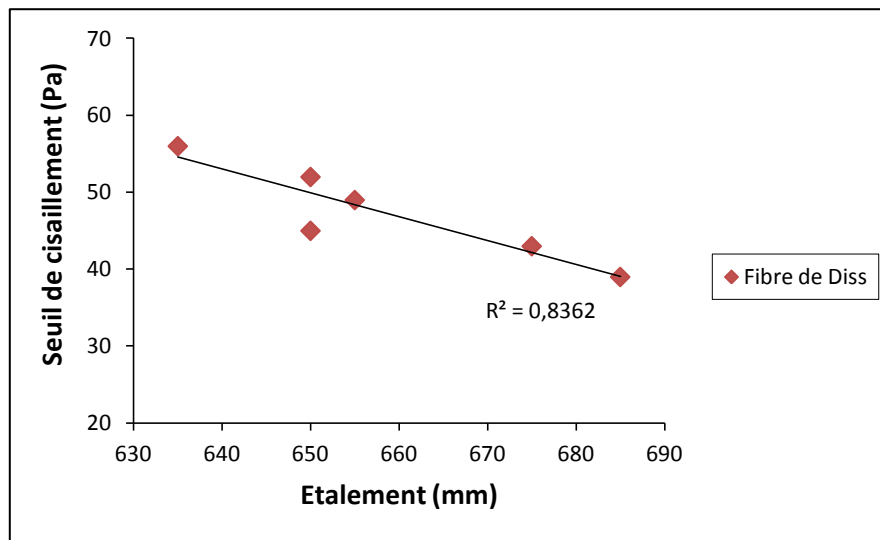


Figure 5.11. Relation entre l'étalement et le seuil de cisaillement de la boîte LCPC pour les BAP avec fibres de diss

2.7.2. Viscosité plastique

Les résultats présentés sur la figure 5.12 sur la viscosité plastique corroborent les résultats obtenus sur le seuil de cisaillement.

L'introduction des fibres de PP ou de diss entraîne une augmentation de la viscosité plastique des mélanges qui est principalement influencée par le taux de fibres et secondairement par leur nature (El Hilali, 09). La viscosité des BAP renforcés de fibres de PP est plus importante. En effet l'introduction des fibres réduit les paramètres d'ouvrabilité des BAP, ainsi que la vitesse d'écoulement des mélanges à l'état frais.

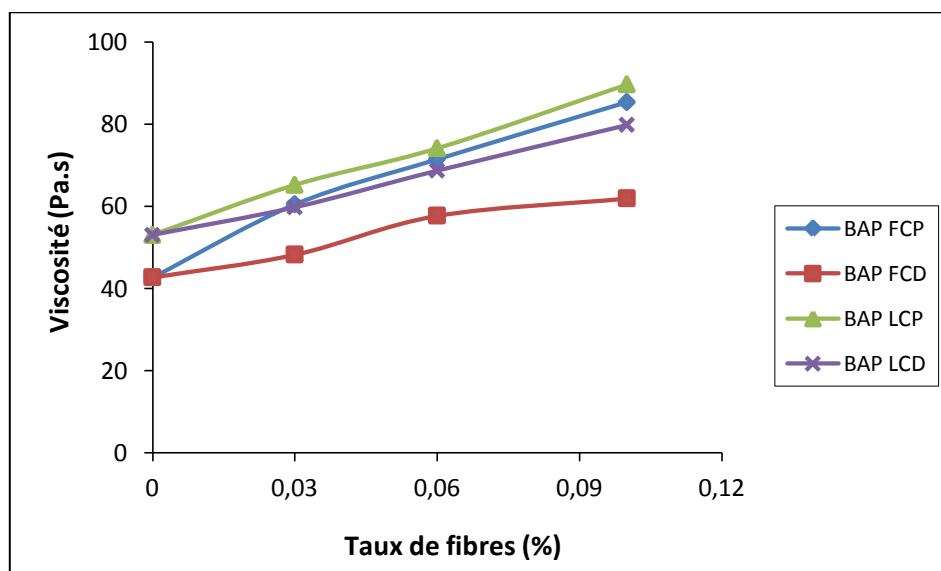


Figure 5.12. Influence des fibres sur la viscosité plastique des BAP

Le temps d'écoulement (T_{500}) et la viscosité plastique montrent une bonne corrélation parce qu'un béton qui présente des temps d'écoulements plus faibles est considéré comme un matériau moins visqueux et plus fluide (figure 5.13 et 5.14).

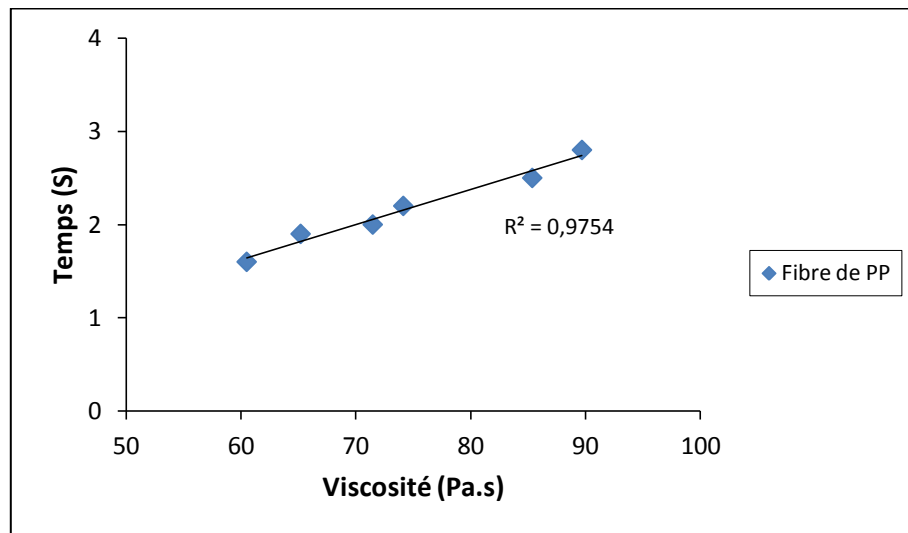


Figure 5.13. Relation entre la viscosité et le temps T_{500} pour les BAP avec fibres de PP

Pour obtenir un béton homogène avec une bonne résistance à la ségrégation, il est indispensable de vérifier ses propriétés à l'état frais (ouvrabilité, stabilité statique et dynamique).

On note qu'un taux de fibre (PP ou diss) supérieur à 0,06% entraîne une perte de fluidité et une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement.

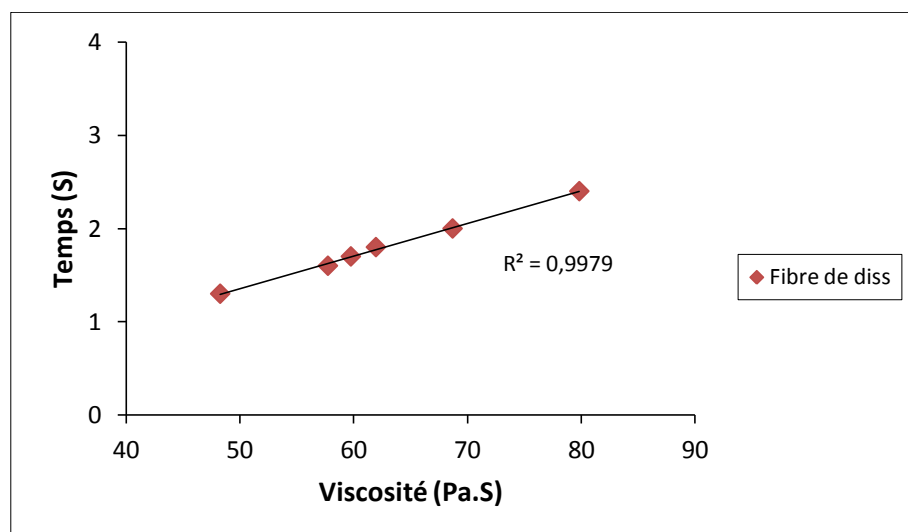


Figure 5.14. Relation entre la viscosité plastique et le temps T_{500} pour les BAP avec fibres de diss

3. RÉSULTATS OBTENUS SUR BAP À L'ÉTAT DURCI

3.1. Caractérisation mécanique des BAP fibrés

3.1.1. Résistance en compression

Dans ce chapitre, nous avons aussi étudié l'effet des fibres synthétiques et végétales sur la résistance mécanique des bétons. Pour chaque fibre, trois dosages différents de fibres sont utilisés (300, 600 et 900 g/m³ pour la fibre de polypropylène et 400, 800 et 1200 g/m³ pour la fibre de diss), cette différence de masse est due aux différences de densité, ce qui permet de garder le même taux volumique de fibrage. Le temps de cure humide est de 2, 7, 28 et 90 jours.

L'introduction des fibres dans les BAP entraîne une légère diminution de la résistance en compression après 2 jours de durcissement (figure 5.15). Les BAP renforcés de fibres de PP présentent des résistances presque semblables à celles des BAP renforcés de fibres de diss. Ainsi, un faible dosage en fibres (0,03%) a un effet négligeable sur la résistance en compression des BAP.

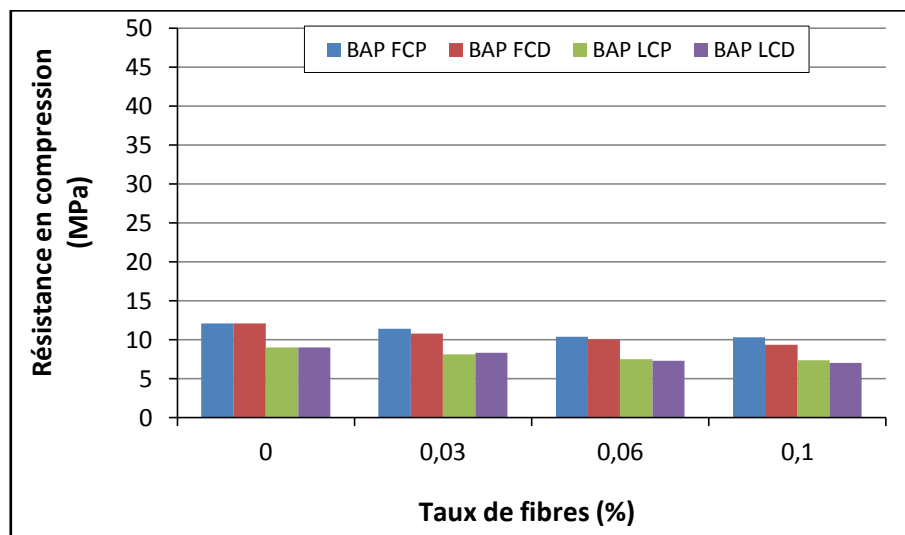


Figure 5.15. Influence des fibres sur la résistance en compression à 2 jours de durcissement

Après 7 et 28 jours de durcissement (figure 5.16, 5.17), le même constat peut être observé qu'à 2 jours, l'emploi des fibres dans les BAP entraîne une légère diminution des résistances en compression, cette diminution est fonction du dosage en fibres.

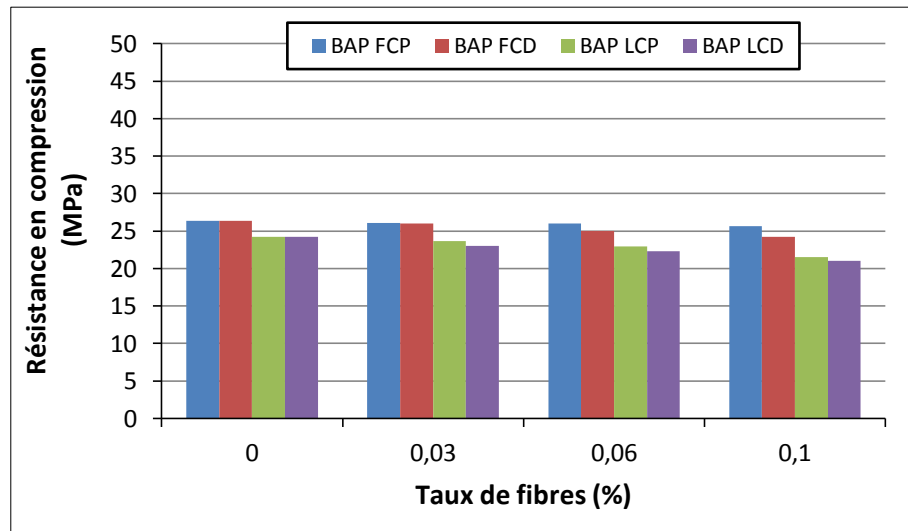


Figure 5.16 Influence des fibres sur la résistance en compression à 7 jours de durcissement

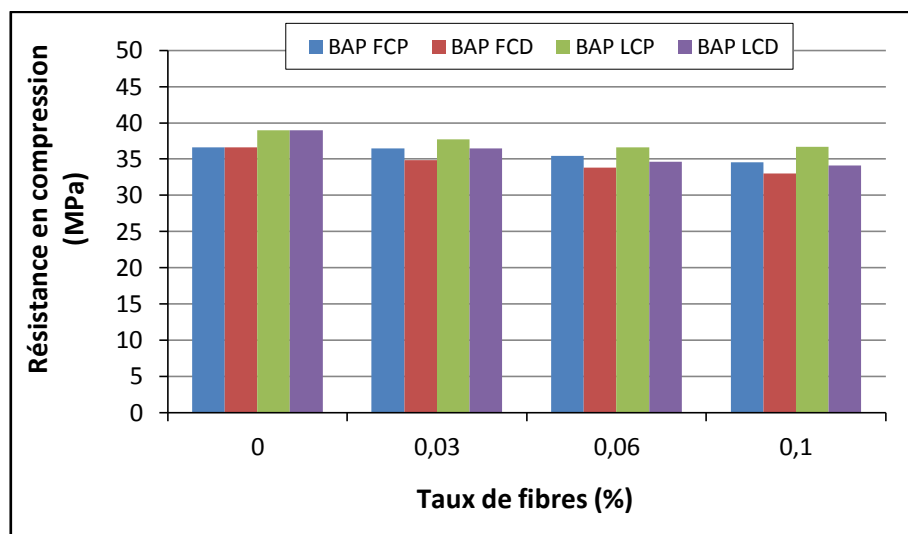


Figure 5.17. Influence des fibres sur la résistance en compression à 28 jours de durcissement

L'introduction des fibres entraîne globalement une légère diminution des résistances en compression (El Hilali, 09). La perte de résistance en compression peut être expliquée par le fait que l'introduction des fibres perturbe la compacité du matériau et entraîne la formation d'une porosité supplémentaire, notamment à l'interface fibre – matrice cimentaire (figure 5.18).

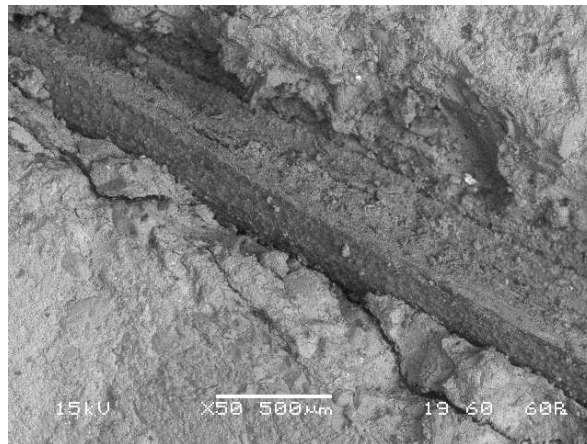


Figure 5.18. Interface fibre de diss – matrice cimentaire après l'écrasement de l'éprouvette (INSA Toulouse)

Généralement, les fibres modifient le réseau poreux des bétons et la diminution des résistances en compression à plus longues échéances (90 jours) dépend du dosage et de la nature des fibres (figure 5.19).

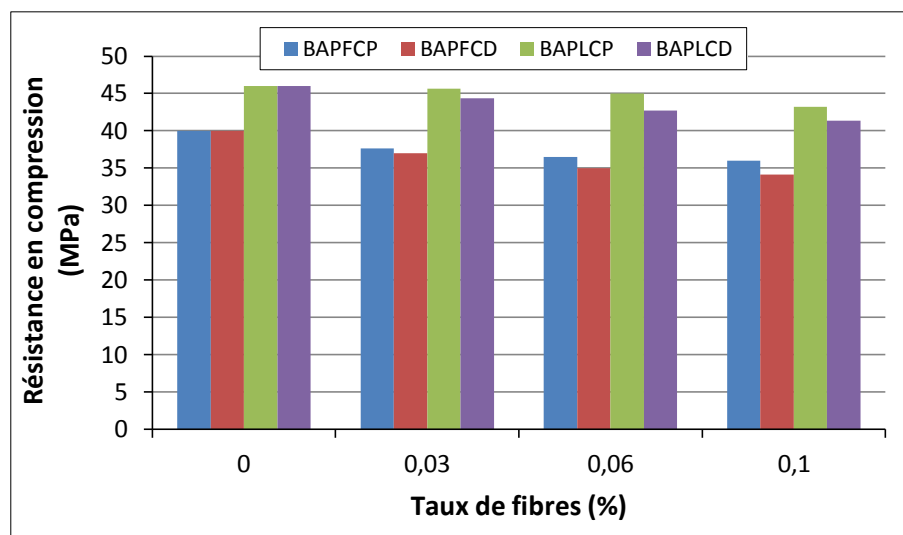


Figure 5.19. Influence des fibres sur la résistance en compression à 90 jours de durcissement

3.1.2. Étude comparative sur la résistance en compression des BAP fibrés

Les résultats obtenus sur les résistances en compression des BAP fibrés sont présentés sur les figures 5.20, 5.21 et 5.22.

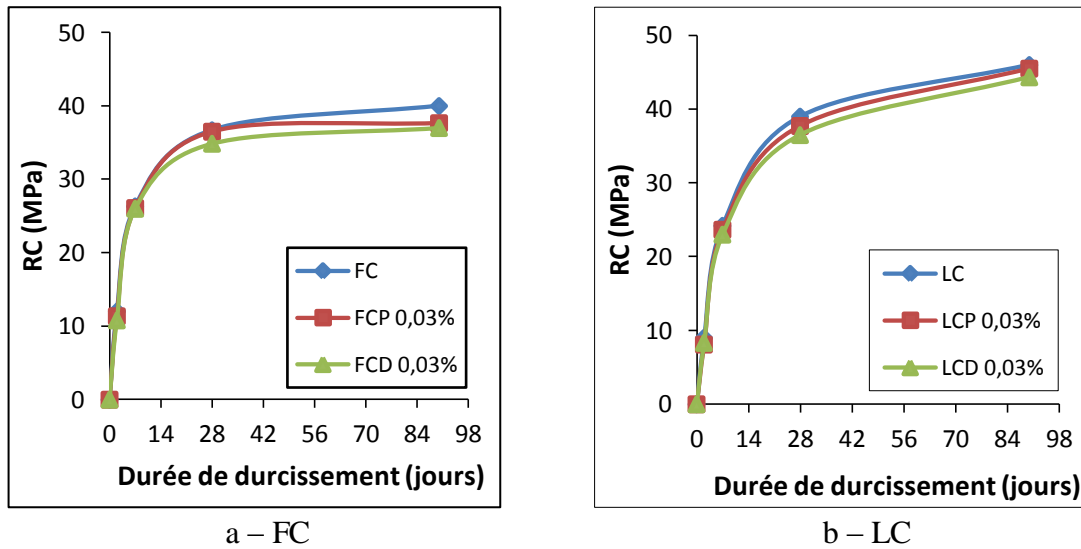


Figure 5.20. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,03 % de fibres

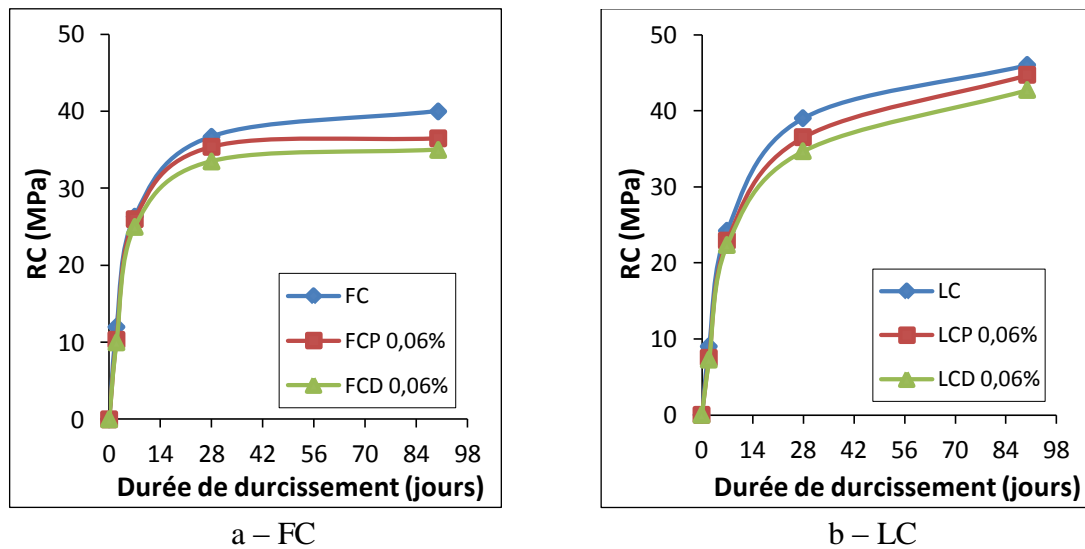


Figure 5.21. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,06 % de fibres

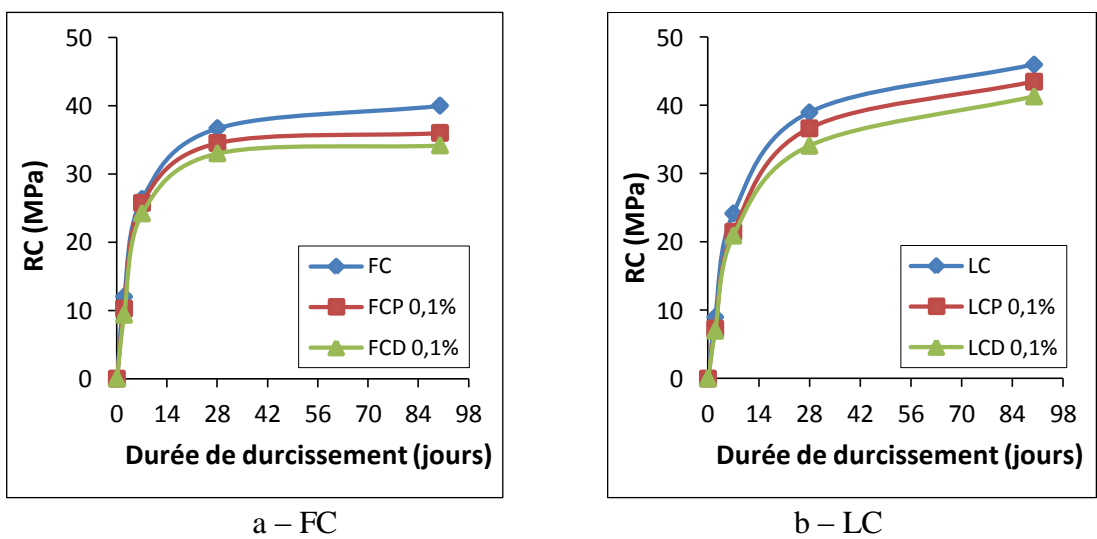


Figure 5.22. Cinétique de durcissement des BAP renforcés par un taux de 0,1 % de fibres

Les résultats obtenus permettent de tirer les enseignements suivants :

- L'introduction des fibres dans les BAP entraîne une perte de résistance en compression, ce qui peut être expliqué par le fait que les fibres forment une porosité supplémentaire dans le béton.
- La perte de résistance en compression augmente avec l'augmentation du dosage en fibres et dépend de la nature des fibres.
- La cinétique de durcissement des bétons n'est pas perturbée par l'introduction des fibres.
- Les BAP avec fibres de diss donnent les plus faibles résistances en compression à long terme, cela est due probablement au caractère hydrophile de la fibre de Diss qui en séchant s'est contractée en provoquant une porosité supplémentaire.

3.1.3. Résistance en traction par flexion

Les figures 5.23 et 5.24 présentent les résistances en traction par flexion des BAP fibrés à 2 et 28 jours. Les résultats obtenus montrent l'effet bénéfique de l'utilisation des fibres dans le BAP (Alcantara, 04 ; A. S. Mohamed, 11).

L'accroissement du taux volumique des fibres (végétales ou synthétiques) entraîne une augmentation de la résistance en traction par flexion des BAP fibrés par rapport au BAP sans fibres. Cependant les BAP avec fibres de Diss garantissent les meilleures résistances par rapport aux BAP avec fibres de PP pour toutes les échéances. Cela pourrait être expliqué par le fait que la fibre végétale se caractérise par un contour rugueux et épineux qui favorise l'adhérence avec la matrice cimentaire, contrairement à la fibre de polypropylène qui se caractérise par une surface lisse.

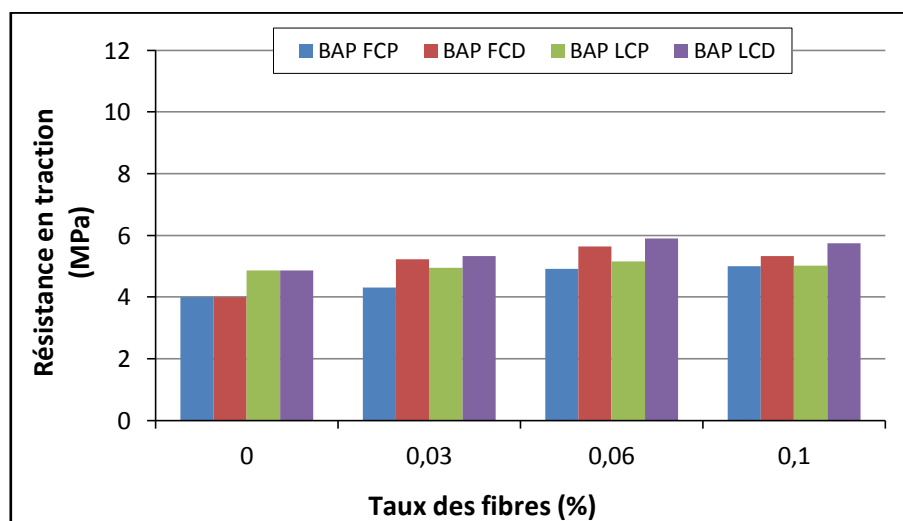


Figure 5.23. Influence des fibres sur la résistance en traction par flexion à 2 jours de durcissement

Les observations post rupture ont permis de mettre en évidence l'orientation des fibres de Diss qui était perpendiculaire à la charge, ce qui améliorerait leur efficacité.

Il est à noter que la facilité de mise en œuvre offerte par les BAP en raison de leur grande fluidité, influe directement sur la bonne dispersion, l'orientation et par conséquent l'efficacité des fibres (El Hilali, 09). Il semble qu'il existe un taux volumique optimal de fibres, de l'ordre de 0.06 % qui correspond à des dosages massiques de 0.6 kg pour les fibres de PP concordant au dosage préconisé par le fabricant et 0.8 kg pour les fibres de diss par m³ de béton (figures 5.23 et 5.24).

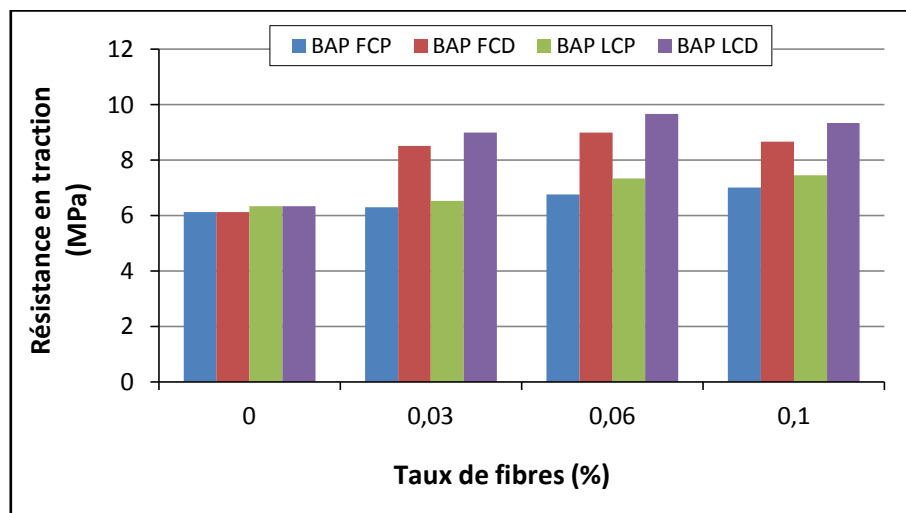


Figure 5.24. Influence des fibres sur la résistance en traction par flexion à 28 jours de durcissement

3.1.4. Étude comparative sur la résistance en traction par flexion des BAP fibrés

Les résultats des essais mécaniques de traction par flexion réalisés sur des BAP fibrés et non fibrés présentés sur les figures 5.25, 5.26 et 5.27, montrent :

- Les deux types de fibres (PP et diss) améliorent les résistances en traction par flexion pour toutes les échéances (2 et 28 jours), mais cette amélioration est plus marquée pour les fibres de diss.

- La résistance en traction des BAP dépend du dosage et de la nature des fibres. Pour un taux volumique de 0,03%, les fibres de PP ont un effet négligeable sur le comportement des BAP en flexion.

- Les BAP renforcés de fibres de diss donnent les meilleures résistances pour tous les dosages. Cependant, les fibres de PP n'améliorent pas la résistance en flexion pour des dosages inférieurs à 0,06% (recommandé par le fabricant).

- Le dosage optimal pour les deux types de fibre peut être établi à 0,6% correspondant à 600 et 800 g/m³ de béton respectivement pour la fibre de polypropylène et la fibre de Diss.

- Après la rupture des éprouvettes (7x7x28 cm), on a remarqué que l'orientation des fibres de PP était aléatoire, alors que celle des fibres de Diss était perpendiculaire à la charge.

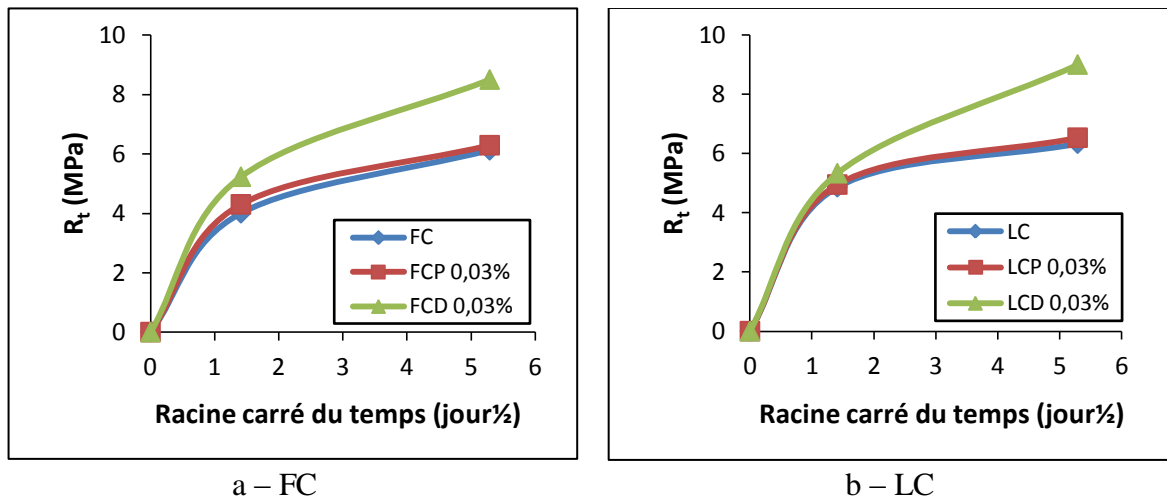


Figure 5.25. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,03%

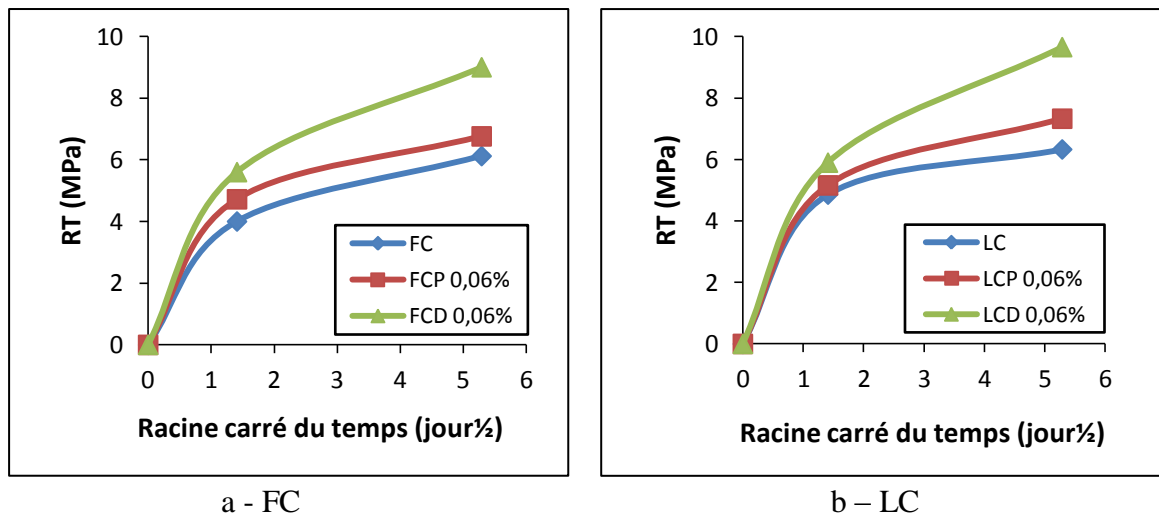


Figure 5.26. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,06%

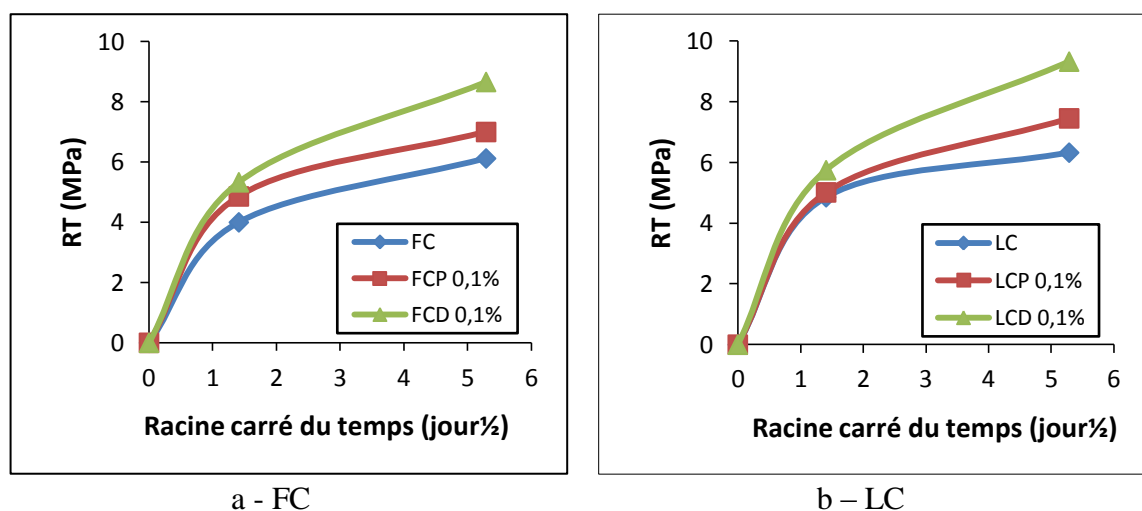


Figure 5.27. Effet de la nature des fibres sur la cinétique de durcissement en traction des BAP fibrés pour un dosage de 0,1%

3.1.5. Exploitation des résultats obtenus (ouvrabilité et résistance mécanique)

Les essais réalisés sur les BAP fibrés à l'état frais et durci, conduisent à un taux volumique optimal de 0,06% pour les deux fibres (polypropylène et diss). En effet, on a noté que la fibre influe sur les propriétés d'ouvrabilité des BAP (diminution de la fluidité et augmentation de la viscosité). Cependant, tous les essais réalisés sur les BAP renforcés avec 0,06% de fibres ont donné des résultats conformes à la norme (NF EN 206-9, 10).

Concernant les caractéristiques mécaniques, les fibres diminuent les résistances en compression des BAP fibrés, par contre elles améliorent les résistances mécaniques en traction par flexion, surtout pour un dosage de 0,06 %.

Les essais qui seront menés sur les BAP pour les mesures de flèche, de retrait empêché et les propriétés de transfert seront réalisés sur des BAP avec un taux de fibrage de 0,06% /m³ de béton. Le tableau 5.1 montre les résultats optimaux obtenus à l'état frais et durci, avec un taux de fibrage de 0,06/m³ de béton.

Tableau 5.1. Paramètres optimaux à l'état frais et durci

Test	Unité	FCPP	FCD	LCPP	LCD	
Etalement au cône	mm	660	675	630	650	
T ₅₀₀	sec	2	1,6	2,2	2	
Boite en L	-	0,86	0,85	0,8	0,82	
Pourcentage de laitance	%	8,5	9,06	5,75	6,73	
Boite LCPC	cm	72	74,5	68,2	69	
Seuil de cisaillement	Pa	46	42	55	52,5	
Viscosité plastique	Pa.s	71	58	74	68	
Résistance à 28 jours	compression	MPa	35,5	33	37	35
	Flexion/traction	MPa	6,5	9	7,33	9,66

3.1.6. Mesure de la flèche et les ouvertures des fissures

Il est opportun de rappeler ici que l'emploi de la fibre de Diss en remplacement de la fibre de polypropylène n'a pas pour but d'améliorer la ductilité des BAP, car ces fibres n'ont pas les caractéristiques mécaniques nécessaires notamment le module d'élasticité longitudinal qui est inférieur à celui d'un béton durci, pour répondre à une telle exigence. Cependant leur rôle s'inscrit pleinement dans l'amélioration de certaines caractéristiques, notamment la fissuration au jeune âge qui peut être néfaste par rapport à la durabilité du béton.

Les résultats obtenus sur les résistances en traction par flexion des BAP avec fibres de Diss en particulier, nous ont incité à entreprendre des essais de mesure de l'effet des fibres sur le comportement des BAP en flexion avec mesure des ouvertures d'entaille.

L'efficacité des fibres est plus remarquée dans le cas du BAP avec fibre de diss et reste négligeable pour le BAP avec fibre de PP (figure 5.28 et 5.29). Les fibres de diss ont donné de meilleurs résultats en raison probablement de leur adhérence et de leur orientation préférentielle observée lors des essais mécaniques. Il est connu que l'orientation est un paramètre essentiel pour activer le transfert de la charge vers la fibre (Boulekbache *et al*, 09).

Les figures 5.28 et 5.29 montrent les résultats obtenus en traction par flexion 3 points sur les courbes force – ouverture d'entaille des BAPFC et BAPLC fibrés.

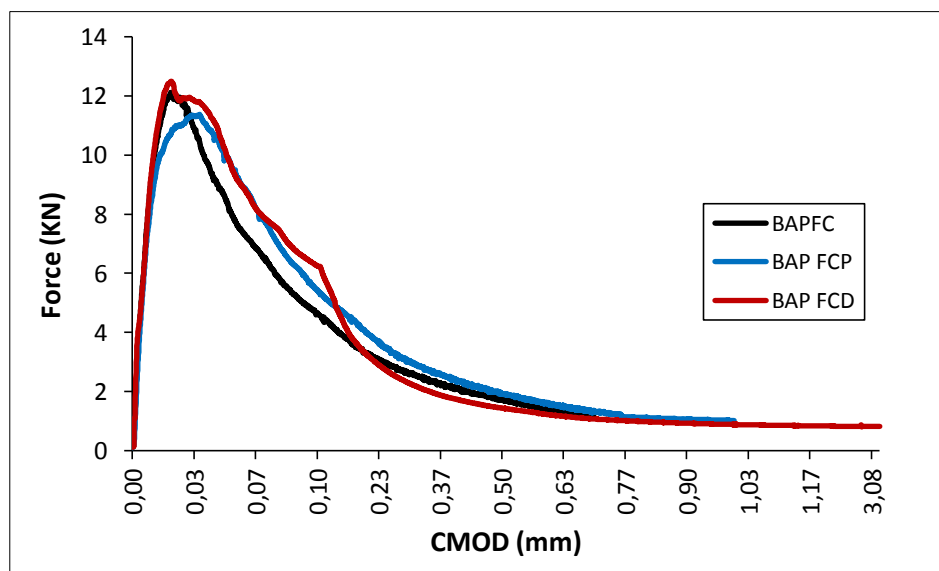


Figure 5.28. Courbes force – ouverture d'entaille des BAPFC fibrés

Les BAP avec fibres de PP présentent des résistances mécaniques inférieures à celles du BAP témoin, contrairement aux BAP avec les fibres de diss qui augmente la résistance mécanique du matériau. Les fibres ont la capacité de contrôler l'ouverture des fissures, jouant ainsi le rôle d'absorbeurs d'énergie (Boulekbache *et al*, 09).

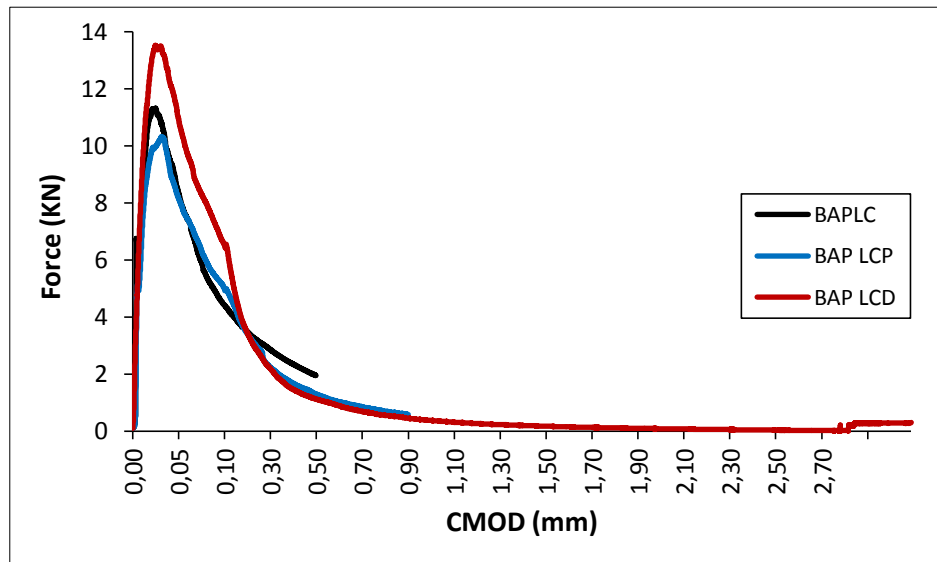


Figure 5.29. Courbes force – ouverture d’entaille des BAPLC fibrés

La première fissure est définie lorsque la courbe effort-flèche cesse d’être linéaire. Les figures 5.30 et 5.31 présentent les résultats obtenus sur les courbes force - flèche des BAP fibrés.

Les fibres de diss assurent une bonne adhérence avec le matériau cimentaire, ce qui permet d’améliorer la capacité portante du béton. Cependant, la résistance mécanique affaiblit pour des flèches ou des ouvertures de fissures importantes.

Les fibres de PP ne présentent pas une résistance mécanique intéressante (Alcantara, 04), contrairement aux fibres de diss qui présentent une meilleure adhérence avec la matrice cimentaire et garantissent des résultats intéressants par rapport aux BAP avec fibre de PP (figure 5.31).

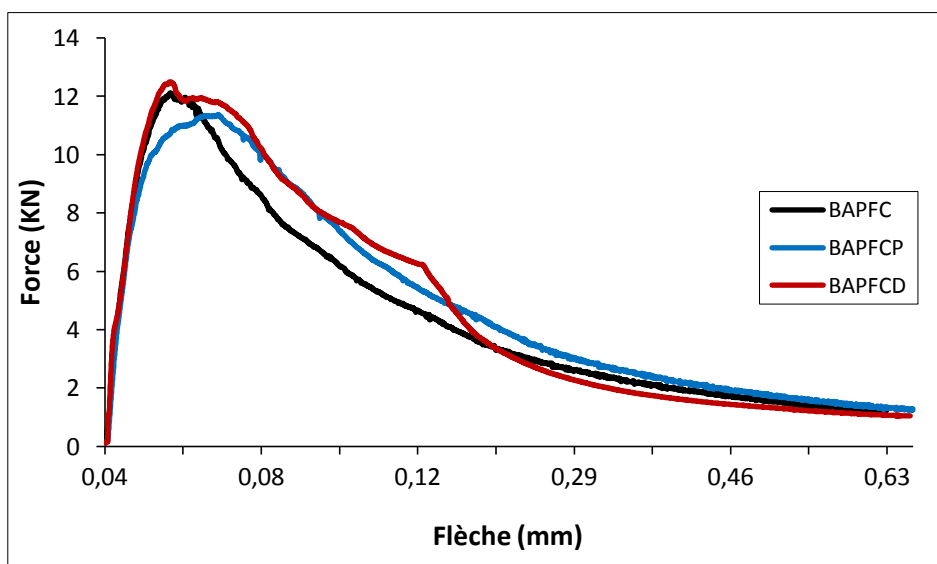


Figure 5.30. Courbes forces – flèche des BAPFC fibrés

Les fibres de Diss se caractérisent par un contour rugueux et épineux, assurant un bon ancrage mais se caractérisent aussi par un module d'élasticité pratiquement le double de celui de la fibre de polypropylène (figure 5.31).

On peut constater aussi que les fibres améliorent légèrement la capacité de déformation des bétons, surtout pour le cas des fibres de polypropylène (Alcantara, 04).

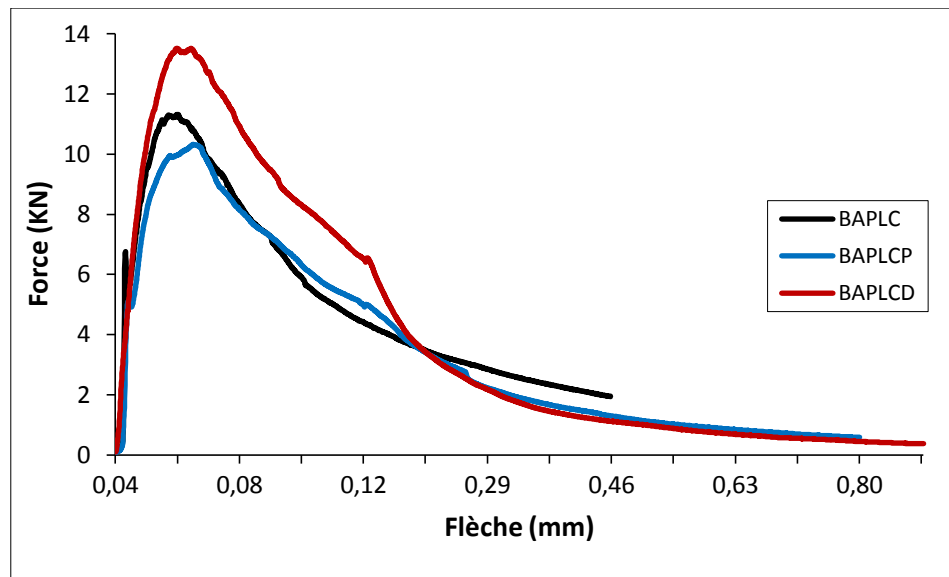


Figure 5.31. Courbes forces – flèche des BAPLC fibrés

Les figures 5.32 et 5.33, montrent un gain de résistance au niveau des BAP avec fibre de diss par rapport aux autres BAP. Ce gain peut être expliqué par l'efficacité des fibres de diss dans l'augmentation de la capacité portante des BAP, grâce à une meilleure adhérence et une orientation adéquate (Boulekbache *et al.*, 09).

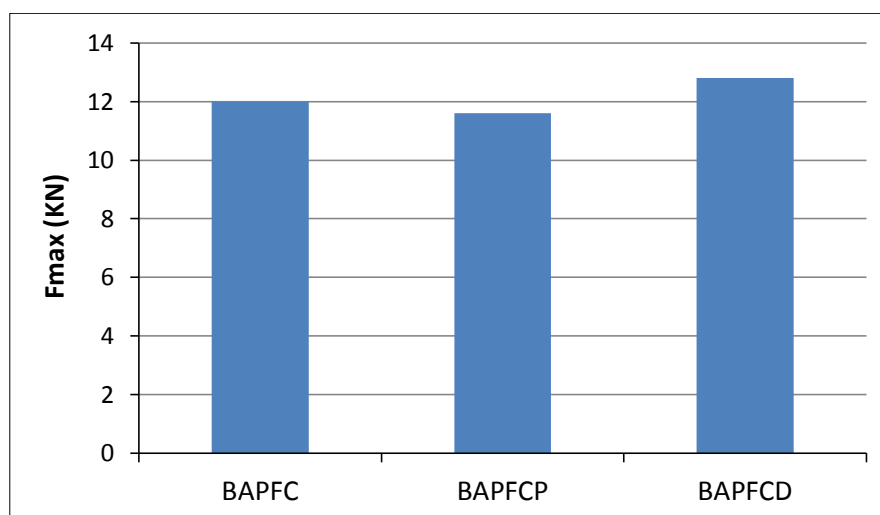


Figure 5.32. Evolution de la capacité portante des BAPFC en fonction de la nature des fibres

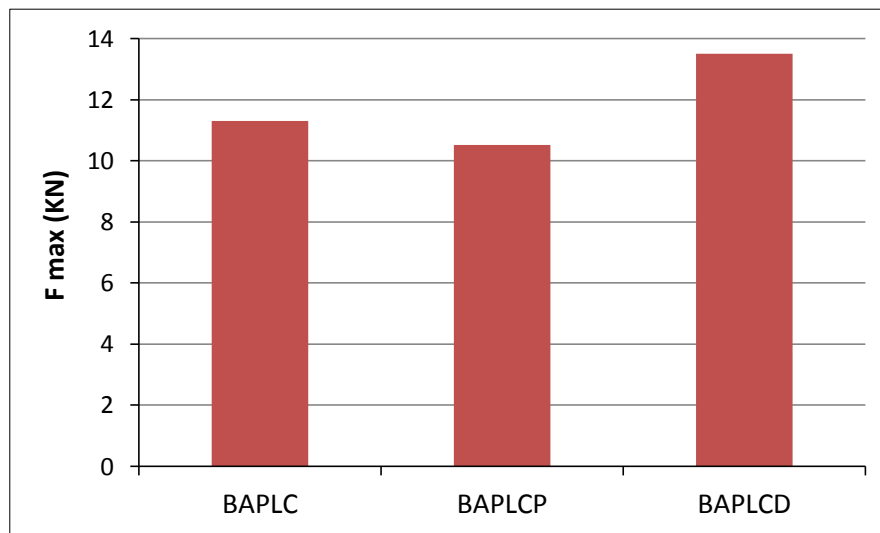


Figure 5.33. Evolution de la capacité portante des BAPLC en fonction de la nature des fibres

Le caractère fluide des BAP participe à la bonne répartition des fibres, à leur orientation qui dépend aussi de leurs caractéristiques physiques et géométriques. Cependant l'adhérence des fibres à la matrice cimentaire dépend essentiellement de leur contour et de leur surface. Les fibres de Diss qui se caractérisent par une densité plus élevée et un état de surface épineux et dont le nombre est inférieur à celui des fibres de polypropylène pour un même taux de fibrage, ont pleinement mis à profit le caractère fluide du BAP contrairement à la fibre de polypropylène dont les caractéristiques physiques et géométriques ne semblent pas correspondre au caractère fluide du BAP. C'est pour ces raisons que la capacité portante est plus marquée dans le cas des fibres de diss et reste faible pour les fibres de polypropylène.

4. RETRAIT EMPÊCHÉ

La figure 5.34 montre l'évolution dans le temps de la déformation mesurée sur la surface intérieure de l'anneau en acier. Cette déformation est une conséquence de l'étreinte du béton sur l'anneau métallique. Elle est partiellement empêchée, ce qui entraîne le développement d'une contrainte de traction en concurrence avec le développement de la résistance du matériau. A une échéance donnée, cette contrainte contrebalance la résistance du matériau et une fissure apparaît.

Les résultats obtenus, montrent que toutes les fibres permettent de diminuer l'étreinte du matériau cimentaire sur l'anneau métallique, ceci étant plus remarquable pour les fibres de polypropylène. Le BAP renforcé par des fibres de polypropylène exerce une étreinte moins intense que celle induite par un BAP renforcé par des fibres de diss (figure 5.34).

La diminution soudaine de la déformation (chute supérieure à 30 $\mu\text{m}/\text{m}$) est une conséquence de la fissuration du béton qui entraîne spontanément une relaxation de l'anneau métallique. Dans ce sens on peut constater que le BAP témoin (BAP FC sans fibres) a une

sensibilité à la fissuration en conditions de retrait empêché plus élevée que les autres BAP (fissuration après 12 jours de fabrication).

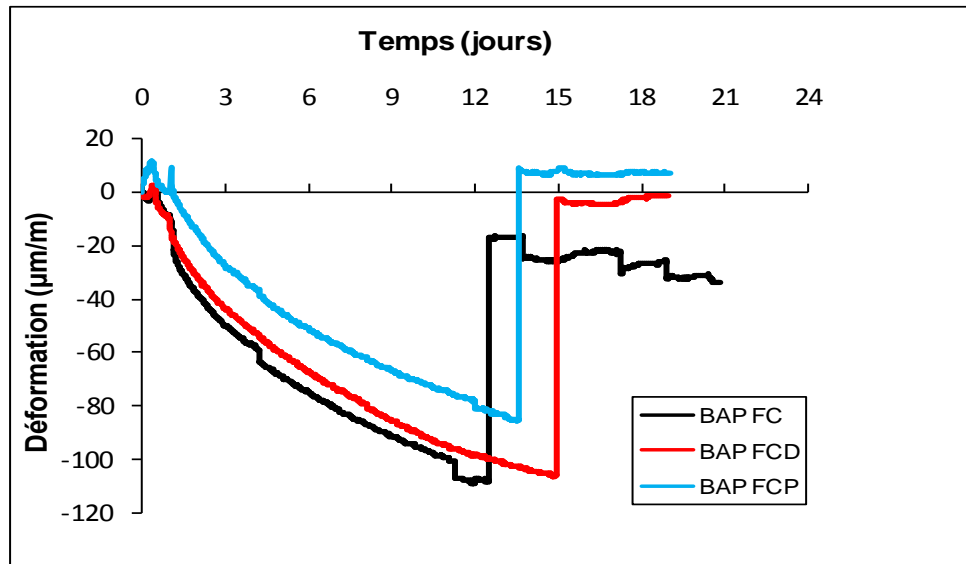


Figure 5.34. Evolution dans le temps de la déformation de l'anneau métallique sous l'étreinte due aux variations dimensionnelles des BAPFC fibrés

Généralement, les BAP fibrés à base du laitier cristallisé présentent les meilleurs résultats. Ainsi, les fibres de diss permettent de retarder significativement l'échéance de la fissuration à 16 jours au lieu de 14 jours pour les fibres de polypropylène (figure 5.35).

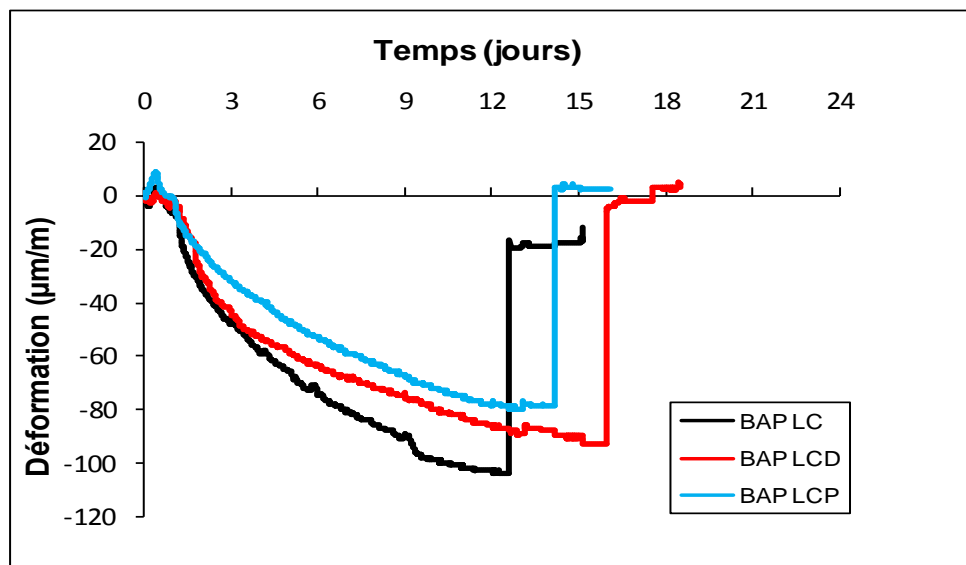


Figure 5.35. Evolution dans le temps de la déformation de l'anneau métallique sous l'étreinte due aux variations dimensionnelles des BAPLC fibrés

Dans ces conditions, on peut affirmer que les fibres végétales peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait des matériaux cimentaires (figure 5.36).



Figure 5.36. Fissuration de l'éprouvette annulaire

5. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT

5.1. Absorption capillaire

5.1.1. Perte de masse

La figure 5.37 montre la perte de masse des BAP fibrés avec addition du FC après une durée de cure de 28 jours. Les éprouvettes ont été conservées dans une étuve à $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à une masse constante, selon le protocole de l'AFERM (AFREM, 97).

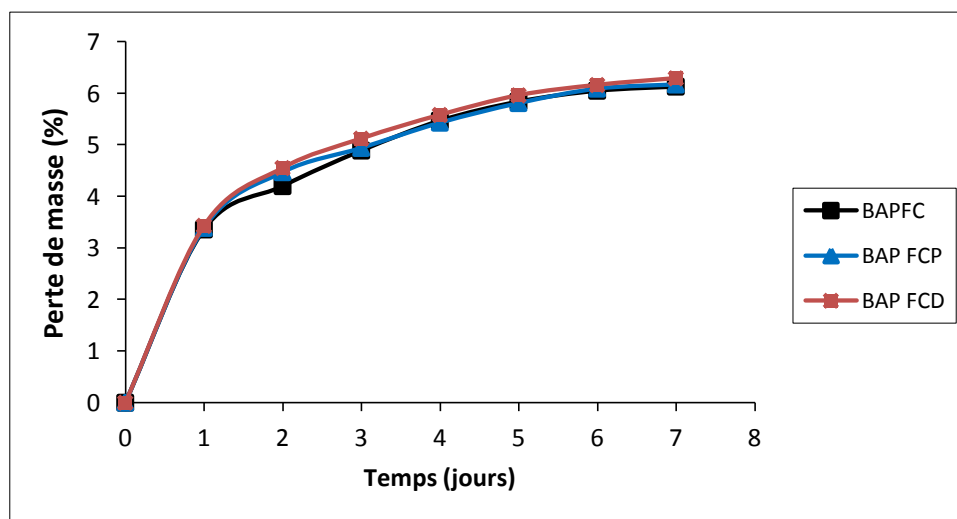


Figure 5.37. Perte de masse des BAPFC fibrés due à leur séchage

Les résultats obtenus montrent que les BAP fibrés donnent des pertes de masse presque identiques à celles du BAP sans fibre, ce qui signifie que les fibres n'influent pas beaucoup sur l'absorption capillaire des BAP à base de filler calcaire.

La figure 5.38 présente la perte de masse des BAP fibrés avec addition de LC. Contrairement aux BAP fibrés à base de FC, les BAP fibrés à base de LC présentent des pertes de masse légèrement supérieures à celles du BAP sans fibre. Cependant, les fibres de PP ont des pertes moins importantes que les fibres de diss.

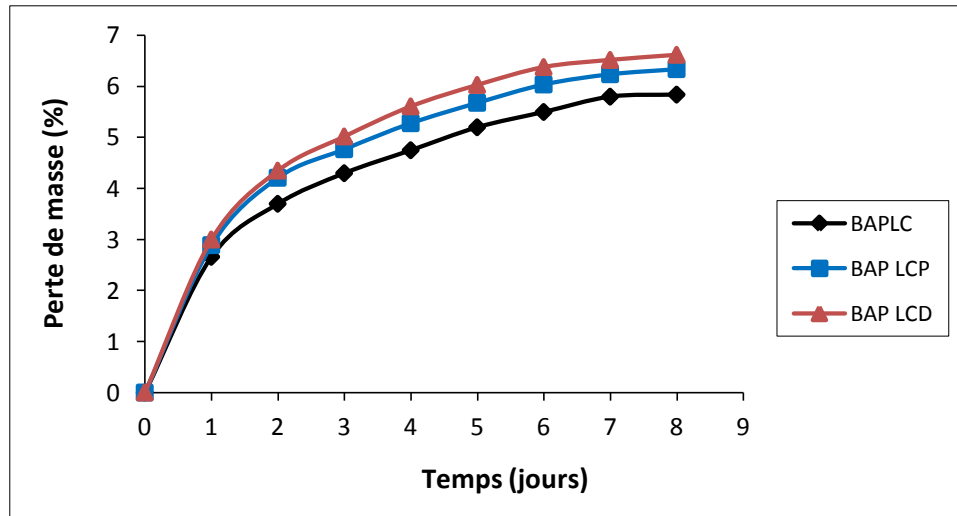


Figure 5.38. Perte de masse des BAPLC fibrés due à leur séchage

Les fibres diminuent la compacité des bétons et favorisent la formation de pores capillaires supplémentaires à l'interface fibre – matrice cimentaire, qui sont connectés avec le milieu extérieur.

La perte de masse des BAP renforcés de fibres de diss comprend probablement une quantité d'eau résultant du séchage des fibres végétales. Alors que la perte de masse des BAP avec fibre de polypropylène résulte du départ d'eau du réseau de pores supplémentaire créé par l'incorporation des fibres.

5.1.2. Coefficient d'absorption capillaire

Les résultats du coefficient d'absorption capillaire des BAP fibrés avec addition du FC sont présentés sur la figure 5.39.

On peut noter que les BAP fibrés ont des coefficients d'absorption comparables à ceux du BAP sans fibres. Mais au delà de 3 heures, les BAP fibrés présentent une absorption capillaire légèrement supérieure à celle du BAP sans fibres. Ce qui indique que les fibres influent sur la capacité d'absorption d'eau du béton, en modifiant son réseau poreux.

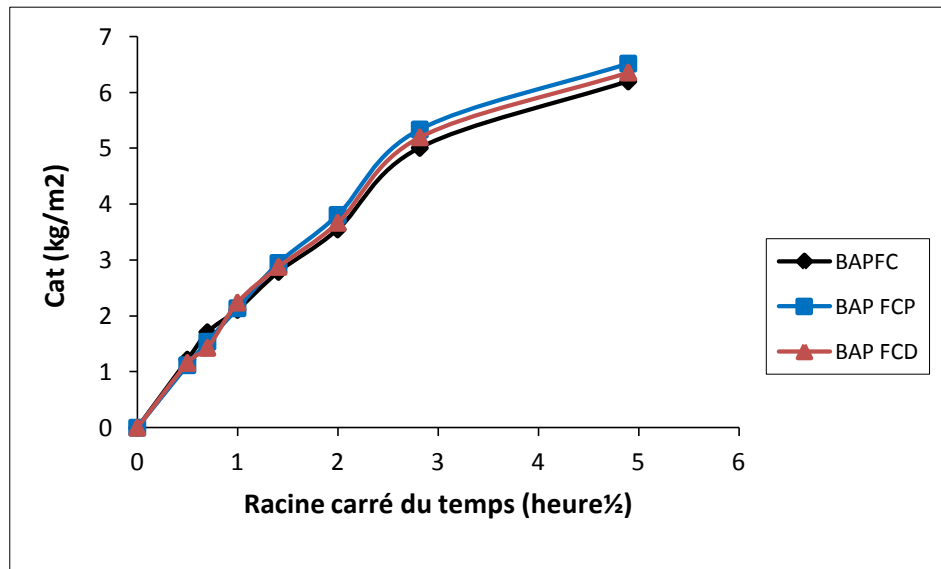


Figure 5.39. Coefficient d'absorption d'eau des BAPFC fibrés

La figure 5.40 illustre les résultats de l'absorption capillaire des BAP fibrés avec addition de LC. Le renforcement des BAPLC par les fibres de PP ou de diss entraîne une augmentation de l'absorption capillaire, mais qui reste équivalente à celle du BAPFC avec PP et Diss.

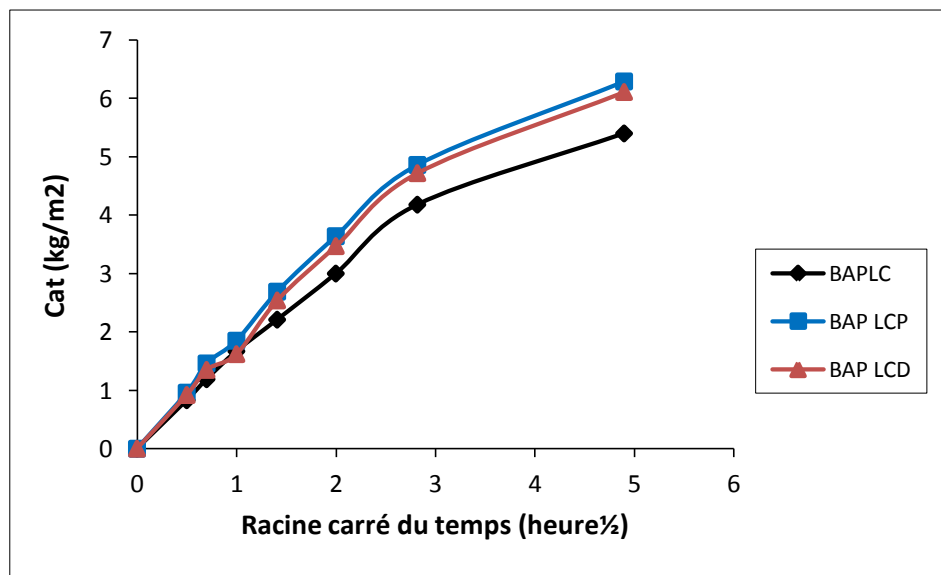


Figure 5.40. Coefficient d'absorption d'eau des BAPLC fibrés

L'introduction des fibres dans les BAP modifie le réseau poreux du matériau en créant une porosité supplémentaire à l'interface fibre – matrice cimentaire (figure 5.41). Les BAP avec fibres de diss ont des coefficients légèrement inférieurs à ceux des BAP avec fibres de PP, cela est dû probablement au nombre de fibres de diss qui est inférieur à celui des fibres de PP.

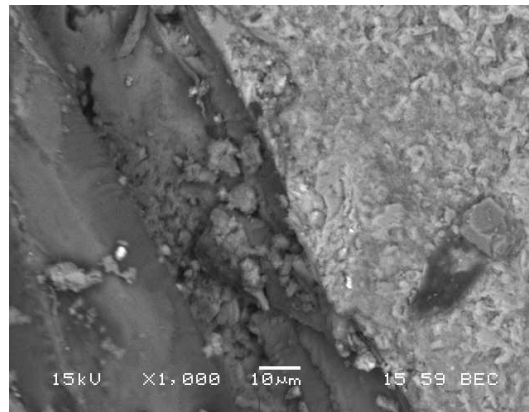


Figure 5.41. Interface fibre de diss – matrice cimentaire (INSA-Toulouse)

5.2. Porosité accessible à l'eau

La figure 5.42 illustre les résultats obtenus sur la porosité ouverte des bétons fibrés après un temps de cure de 28 jours (AFREM, 97).

La porosité accessible à l'eau du BAPFC est supérieure à celle du BAPLC en raison des natures différentes des additions, le FC est un produit inerte alors que le laitier cristallisé, en dépit du refroidissement lent qu'il a subi, se caractérise par un pouvoir hydraulique latent.

De façon analogue, les BAP fibrés à base du FC présentent une porosité supérieure à celle des BAP fibrés à base du LC.

L'ajout des fibres (PP et diss) entraîne une augmentation de la porosité des bétons. Cette augmentation est plus distinguée pour les BAP renforcés de fibres de PP. Le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss, ce qui favorise la formation des pores et des vides dans les BAP.

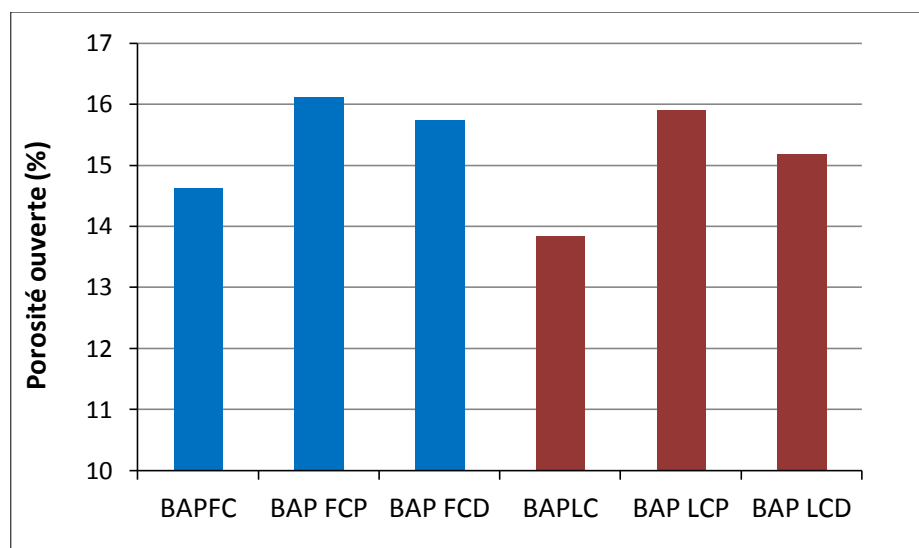


Figure 5.42. Porosité ouverte des BAP fibrés

5.3. Carbonatation accélérée

Cet essai a été réalisé grâce à la méthode proposée par l'AFPC-AFREM (AFREM, 97).

5.3.1. Suivi de masse

Les figures 5.43 et 5.44 présentent les résultats obtenus sur la masse des éprouvettes qui a été mesurée parallèlement aux mesures des profondeurs carbonatées.

Le suivi des masses de l'éprouvette a permis de mettre en évidence deux phases :

- la première augmentation de la masse rapide correspondrait à la mise en équilibre hygrométrique des échantillons.
- La deuxième augmentation moins rapide correspondrait à la phase de carbonatation.

Les BAP fibrés présentent des masses légèrement supérieures à celles des BAP sans fibres. L'incorporation des fibres dans les BAP entraîne la formation des pores capillaires longeant le réseau de fibre, qui facilitent ainsi la diffusion de l'humidité de l'air et du CO_2 à l'intérieur du béton durci.

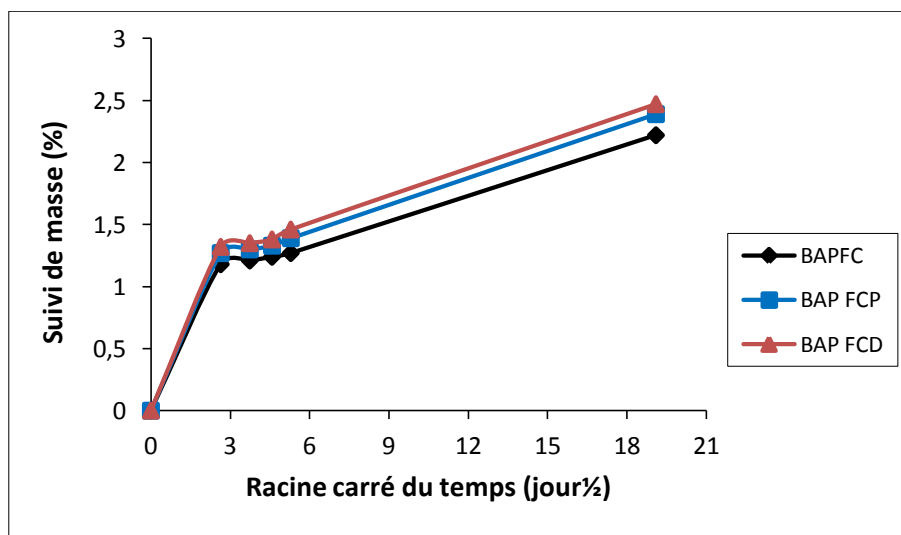


Figure 5.43. Variation de la masse des BAPFC fibrés due à la carbonatation

Les résultats obtenus, montrent que l'augmentation de la masse des BAP avec fibre de Diss est légèrement supérieure à celle des BAP avec fibre de PP quelque soit la nature de l'addition utilisée (FC ou LC), ce qui peut être expliqué par la nature de la fibre de Diss qui se caractérise par un pouvoir d'absorption d'eau et un état de surface rugueux.

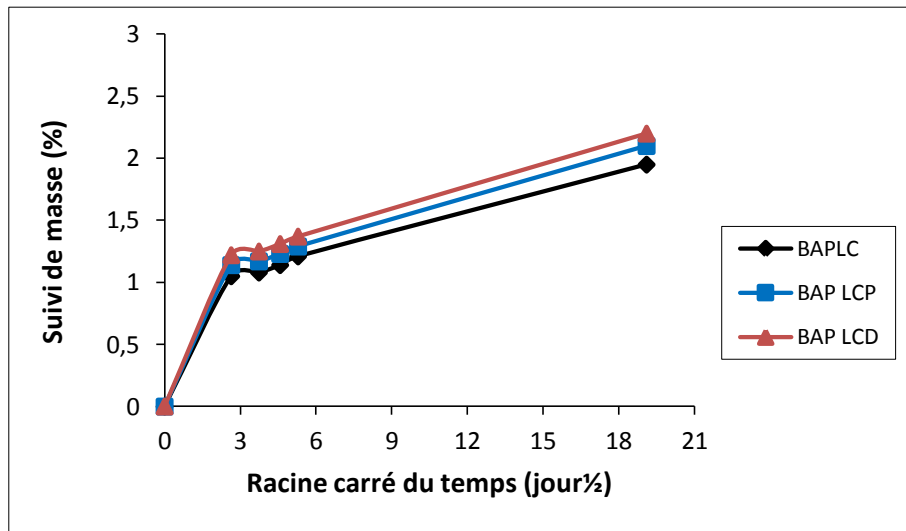


Figure 5.44. Variation de la masse des BAPLC fibrés due à la carbonatation

5.3.2. Profondeur carbonatée

Les profondeurs carbonatées des BAP fibrés ont été mesurées à des échéances de 7, 14, 21, 28 et 365 jours. Cela après un temps de cure humide de 28 jours.

Les résultats présentés sur les figures 5.45 et 5.46, montrent que les BAP renforcés de fibres (PP ou diss) présentent des profondeurs carbonatées supérieures à celles du BAP sans fibres. L'introduction des fibres entraîne une diminution de la compacité des bétons, corroborant ainsi les résultats obtenus sur les masses.

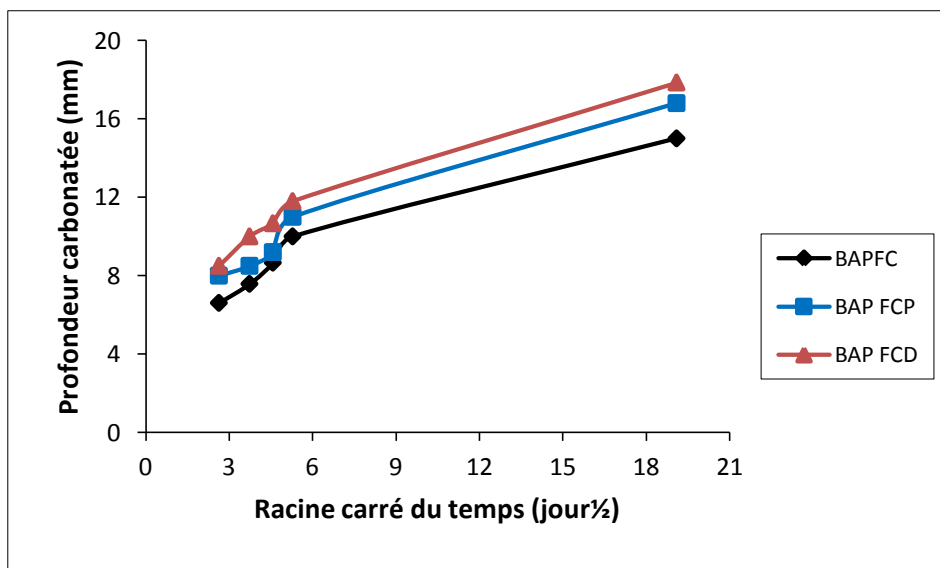


Figure 5.45. Profondeur dégradée des BAPFC fibrés due à la carbonatation

Les BAP avec fibres de Diss ont des profondeurs carbonatées supérieures à celles des BAP avec fibre de PP.

L'incorporation de fibres dans les BAP peut augmenter leur sensibilité vis-à-vis d'attaques externes tel que la carbonatation. Les BAP fibrés à base de LC présentent les meilleurs résultats à toutes les échéances, corroborant ainsi les résultats de l'absorption capillaire et la porosité ouverte.

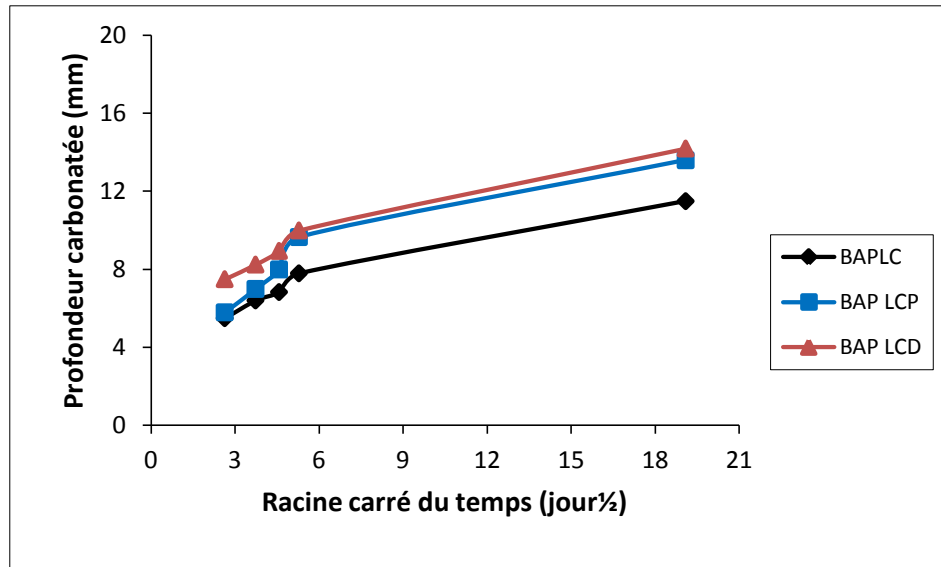


Figure 5.46. Profondeur dégradée des BAPLC fibrés due à la carbonatation

6. CONCLUSION

Le but de cette partie de travail est de mettre en évidence l'effet des fibres végétales de diss sur les caractéristiques des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci par rapport à un BAP renforcé de fibres synthétiques de polypropylène et un BAP non fibrés.

Trois dosages en fibres ont été testés pour déterminer le dosage optimal. Le choix de ces dosages a été fait en adoptant le dosage recommandé par le fabricant des fibres de polypropylène comme valeur moyenne.

Après avoir adopté le dosage optimal en fibres à partir d'essais sur béton frais et durci, des tests spécifiques et de durabilité ont été conduits sur des BAP dont le dosage en fibres a été optimisé.

Les résultats des différents essais menés nous permettent de tirer les enseignements suivants :

- **Sur béton frais**

- L'incorporation des fibres dans les BAP entraîne une perte de fluidité, celle-ci est d'autant plus importante que le taux de fibrage est croissant. L'étalement des BAP est gêné par les fibres (Grunewald et Walraven, 01). La perte de fluidité est justifiée par la

diminution de l'étalement, l'augmentation du temps d'étalement T_{500} , de la viscosité et du seuil de cisaillement.

- Les paramètres de qualification des BAP (étalement, T_{500} , stabilité et pouvoir de remplissage) restent conformes aux normes pour un taux volumique de fibres de 0,06 % correspondant aux dosages de 600 et 800 g/m³ de béton, respectivement pour la fibre de polypropylène et la fibre de Diss.
- L'effet des fibres de diss est légèrement moins important que celui des fibres de PP sur la fluidité et la stabilité des BAP, car d'une part les fibres de diss sont introduites dans le BAP à l'état saturé d'eau et d'autre part le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss.
- L'incorporation des fibres dans les BAP augmente de façon notable le volume d'air occlus.

- **Sur béton durci**

- L'ajout des fibres dans les BAP entraîne une légère perte de résistance en compression qui est croissante avec le taux de fibres.
- La perte de résistance en compression peut être expliquée par le fait que l'introduction des fibres perturbe la compacité du matériau et entraîne la formation d'une porosité supplémentaire.
- A longs termes (28 et 90 jours), les BAP avec fibres de PP donnent des résistances en compression légèrement supérieures à celles des BAP avec fibres de Diss. Cette différence dépend de la nature des fibres, cela est due probablement au caractère absorbant de la fibre de Diss qui en séchant s'est contractée en provoquant une porosité supplémentaire sans oublier que la fibre de diss à présentée une orientation parallèle à la charge.
- L'introduction des fibres dans les BAP améliore les résistances en traction par flexion, cette amélioration est croissante avec l'augmentation du taux de fibres.
- Les résultats obtenus sur les résistances en traction par flexion montrent qu'il existe un taux optimal de fibre de l'ordre de 0.06 % coïncidant avec le dosage préconisé par le fabricant pour les fibres de PP. Les Dosages pondéraux correspondants sont de 0.6 et 0,8 (kg/m³ de béton) respectivement pour les fibres de PP et les fibres de Diss.
- Les BAP avec fibres de Diss garantissent de meilleures résistances en traction que les BAP avec fibres de PP pour toutes les échéances. Cela est due à la rugosité de la surface de la fibre de diss constituée d'épines qui favorisent l'adhérence avec le matériau cimentaire. En plus la fibre de diss présente une orientation perpendiculaire à la charge. En effet, l'orientation des fibres de PP était aléatoire alors que celles des fibres de Diss était orientées dans le sens des efforts de traction.
- Le caractère fluide des BAP contribue à la bonne distribution des fibres et à leur orientation dans la masse du béton qui dépend aussi de leurs caractéristiques physiques. Cependant l'ancrage des fibres à la matrice cimentaire dépend essentiellement de leur contour et de leur état de surface. A cet effet les fibres de Diss qui se caractérisent par une densité plus élevée et un état de surface épineux et dont le

nombre est inférieur à celui des fibres de polypropylène pour un même taux de fibrage, ont pleinement mis à profit le caractère fluide du BAP.

- La capacité portante des BAP avec fibre de diss a été améliorée, présentant ainsi l'effet de l'adhérence entre la matrice cimentaire et la fibre végétale d'une part. D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que le module longitudinal de la fibre de Diss est pratiquement le double de celui de la fibre de polypropylène.
- Les fibres de diss permettent de retarder significativement l'échéance de la fissuration à 16 jours au lieu de 14 jours pour les fibres de polypropylène. Dans ces conditions, on peut affirmer que les fibres végétales peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration prématurée des matériaux cimentaires.

- **Sur la durabilité**

- L'incorporation des fibres dans les BAP affecte la porosité, or la porosité contrôle l'ensemble des caractéristiques de durabilité. C'est pourquoi il était nécessaire de vérifier quelques paramètres permettant le transfert d'agents agressifs par écoulement (porosité accessible à l'eau, absorption capillaire) ou par diffusion (la carbonatation).
- L'ajout des fibres (PP et diss) entraîne une augmentation de la porosité des bétons.
- La porosité des BAP renforcés de fibres de PP est légèrement supérieure à celle des BAP avec fibres de Diss ce qui peut être expliqué par le fait que le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss, favorisant ainsi la formation d'une plus grande porosité supplémentaire dans les BAP.
- Le pouvoir absorbant des BAP avec fibres de Diss montré par les résultats obtenus est la conjugaison de l'absorption capillaire et de l'absorption des fibres de Diss qui se caractérisent par un pouvoir d'absorption d'eau contrairement aux fibres de PP dont le pouvoir d'absorption est quasiment nul.
- Les résultats obtenus sur la carbonatation montrent que les BAP renforcés de fibres (PP ou diss) ont des profondeurs carbonatées supérieures à celles du BAP sans fibres, car l'introduction des fibres entraîne une diminution de la compacité des bétons.
- Les BAP avec fibres de Diss ont des profondeurs carbonatées légèrement supérieures à celles des BAP avec fibre de PP.

L'emploi des fibres végétales de Diss dans les BAP en substitution des fibres synthétiques de polypropylène est intéressant à plusieurs niveaux :

- Les critères d'autoplaçance sont garantis.
- Les propriétés physiques et mécaniques sont améliorées.
- Le caractère durable semble être au moins équivalent.
- La fibre de Diss est un matériau renouvelable et sans impact environnemental contrairement à la fibre de polypropylène.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le béton autoplaçant (BAP) présente plusieurs intérêts socio-économiques et techniques. La facilité de mise en place permet en effet de produire des éléments à géométrie complexe ou très ferraillés. Ces avantages lui permettraient certainement de remplacer les bétons dits ordinaires dans plusieurs applications dans l'avenir. Néanmoins, pour réaliser un bon BAP, il est nécessaire de disposer de matériaux de choix et d'outils de formulation permettant d'obtenir un béton satisfaisant les critères d'autoplaçance.

Le but de ce travail était de formuler un BAP avec addition de filler calcaire et d'étudier par la suite les effets de la substitution du filler calcaire par le laitier cristallisé ainsi que l'incorporation des fibres végétales de diss en remplacement des fibres synthétiques de polypropylène sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des BAP.

Les résultats obtenus dans ce travail sont synthétisés comme suit :

- **BAP non fibré**

- ✓ En l'absence d'un volume adéquat de pâte, il est possible d'obtenir un béton fluide à l'aide de superplastifiant, présentant cependant un grand ressuage et une ségrégation établie.
- ✓ L'introduction des additions minérales entraîne une amélioration des propriétés d'ouvrabilité, notamment le pouvoir de remplissage et la stabilité des BAP par rapport au béton de référence (sans addition), ce qui justifie parfaitement l'emploi des additions dans les BAP.
- ✓ L'incorporation des additions dans la composition des BAP, permet l'augmentation du volume de pâte dans le BAP entraînant un meilleur enrobage et l'écartement des gros granulats en limitant les contacts et par conséquent les frottements intergranulaires sans les détacher de la pâte.
- ✓ Les additions minérales améliorent les paramètres d'ouvrabilité des BAP mais pour des dosages de l'ordre de 30 à 45 (%) par rapport à la masse du ciment. Cependant au-delà de ces dosages on note plutôt une perte d'ouvrabilité, de pouvoir de remplissage et de stabilité (le mortier devient trop visqueux pour s'écouler à travers le tamis).
- ✓ La nature de l'addition influe sur les propriétés du béton à l'état frais. L'ajout d'une addition inerte comme le filler calcaire ou le laitier cristallisé améliore les paramètres rhéologiques du mélange et augmente sa résistance à la ségrégation et au ressuage. Mais le dosage optimum pour le laitier cristallisé est de 30 %, parce que au-delà de ce dosage la fluidité du BAP diminue, pouvant entraîner un défaut d'étalement ou des

blocages pendant le coulage par une densification de la pâte du BAP, conséquence de l'augmentation de la viscosité plastique et du seuil de cisaillement. La demande en eau du filler calcaire est inférieure à celle du laitier cristallisé pour une même consistance.

- ✓ Le dosage optimal retenu pour les deux additions est fixé à 30%. Ce dosage assure le caractère autoplaçant des bétons d'étude avec des paramètres optimisés vis-à-vis des valeurs préconisées par les normes.
 - ✓ L'incorporation des additions améliore les résistances mécaniques en compression. Le filler calcaire présente les meilleures résistances mécaniques à court terme par effet de surface. Par contre, le laitier cristallisé augmente les résistances mécaniques à long terme (28 et 90 jours), notamment par effet hydraulique potentiel.
 - ✓ Le BAP à base de laitier cristallisé présente des performances mécaniques remarquables et une bonne résistance aux attaques externes (diffusion du CO₂ et la pénétration de l'eau).
 - ✓ Les résultats obtenus dans cette partie, montrent que l'utilisation des ressources locales et la substitution du filler calcaire par le laitier cristallisé d'El Hadjar est faisable pour un dosage de l'ordre de 30%, garantissant aussi bien le caractère autoplaçant et les performances de résistance en compression et la durabilité des BAP, encourageant ainsi l'emploi de sous produit peu valorisé.
- **BAP fibré**
 - ✓ L'incorporation des fibres dans les BAP entraîne une diminution des paramètres d'ouvrabilité des BAP, celle-ci est d'autant plus importante que le taux de fibrage est croissant. En plus, L'étalement des BAP est gêné par les fibres.
 - ✓ Les paramètres de qualification des BAP (étalement, T₅₀₀, stabilité et pouvoir de remplissage) satisfont les valeurs préconisées par les normes pour un taux volumique de fibres de 0,06 %.
 - ✓ L'effet des fibres de diss est légèrement moins important que celui des fibres de PP sur la fluidité et la stabilité des BAP, car d'une part les fibres de diss sont introduites dans le BAP à l'état saturé d'eau et d'autre part le nombre de fibres de PP est supérieur à celui des fibres de diss pour un même dosage.
 - ✓ L'emploi des fibres provoque une augmentation de la viscosité et du seuil de cisaillement. Cette augmentation est plus marquée pour les BAP renforcés par les fibres de PP.
 - ✓ L'incorporation des fibres dans les BAP entraînent une légère perte de résistance en compression qui est croissante avec le taux de fibrage. La perte de résistance en

compression peut être expliquée par le fait que l'introduction des fibres perturbe la compacité du matériau et entraîne la formation d'une porosité supplémentaire.

- ✓ Les résultats obtenus sur les résistances en traction par flexion montrent qu'il existe un taux optimal de fibre de l'ordre de 0.06 % coïncidant avec le dosage préconisé par le fabricant pour les fibres de PP. Les Dosages pondéraux correspondants sont de 600 et 800 (g/m³ de béton) respectivement pour les fibres de PP et les fibres de Diss. Ces mêmes dosages ont été retenus suite aux résultats obtenus sur béton à l'état frais.
- ✓ Les BAP avec fibres de Diss donnent de meilleures résistances en traction par flexion que les BAP avec fibres de PP. En effet, la rugosité de la fibre de diss constituée d'épines favorise l'adhérence avec la matrice cimentaire d'une part. D'autre part, la fibre de Diss se caractérise par un module d'élasticité longitudinale deux fois plus important que celui de la fibre de polypropylène.
- ✓ Après l'écrasement, les éprouvettes ont montré que l'orientation des fibres de PP était aléatoire alors que celles des fibres de Diss étaient orientées dans le sens des efforts de traction, ce qui pourrait optimiser le nombre de fibres efficaces et par conséquent expliquer au moins, en partie les meilleurs résultats obtenus sur la résistance en traction des BAP avec fibres de Diss.
- ✓ Les fibres de diss permettent de retarder significativement l'échéance de la fissuration par rapport aux fibres de polypropylène. On peut affirmer que les fibres végétales peuvent constituer une alternative intéressante pour améliorer la résistance à la fissuration de retrait au jeune âge des matériaux cimentaires.
- ✓ Les BAP renforcés de fibres végétales présentent une porosité légèrement inférieure à celle des BAP avec fibres de PP. En effet, les fibres végétales ont une densité supérieure à celle de la fibre de polypropylène, ce qui se traduit pour un même volume donné, un nombre de fibres inférieur à celui de la fibre synthétique, ce qui a pour conséquence une compacité de BAP avec fibre de diss plus élevée par rapport au BAP avec fibres de PP.
- ✓ Les BAP avec fibre de Diss ont une plus faible porosité et de meilleures résistances à la fissuration et à la traction, se traduisant par une meilleure durabilité, ce qui est d'ailleurs confirmé par les résultats obtenus, excepté pour la résistance à la carbonatation dont les résultats sont similaires à ceux des BAP avec renfort de fibres de polypropylène, ce qui peut être expliqué par des considérations géométriques (lacunes et défauts du contour de la fibre de Diss) et dimensionnelles (largeur de la fibre de Diss).
- ✓ Les fibres végétales peuvent se développer dans le domaine du génie civil vu leurs caractéristiques, leur renouvellement et leur impact environnemental. Il est vrai que peu d'études ont été réalisées sur ces fibres, toutefois le cadre du concept actuel de

protection de l'environnement et du développement durable, les fibres végétales en général trouveront leur place et peuvent concurrencer les fibres synthétiques dans le proche avenir.

Nous avons tenté d'apporter quelques éléments de réponses et d'éclaircissements sur un sujet innovant, car les BAP constituent à eux seuls une nouvelle technologie des bétons, alors que l'incorporation des fibres de nature végétale constitue une autre dimension novatrice.

Les résultats obtenus sur les BAP aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci sont intéressants et encourageants sur la faisabilité d'un BAP avec addition du laitier cristallisé au lieu du filler calcaire et renforcé de fibres végétales. Cependant il est fortement souhaitable de conduire d'autres options de fibrage des BAP tels que le fibrage hybride ou d'autres types de fibres végétales, etc...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

- ACI 544. (2002).** American Concrete Institute.
- AFGC. (2008).** Association française de Génie Civil. Recommandations provisoires pour l'emploi des Bétons Autoplaçants, 64 pages.
- AFREM. (1997).** Durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques, laboratoire matériaux et durabilité des constructions, Toulouse.
- ALCANTARA M. (2004).** Béton autoplaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique, Thèse doctorat LMDC.
- ALI BOUCETTA T. (2014).** Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes Performances, thèse de doctorat, université d'Annaba, Algérie.
- A. S. MOHAMED. (2011).** Influence de la valorisation des microfibrilles végétales sur la formulation et la résistance aux cycles de gel-dégel de BAP, Thèse doctorat- université de Cergy-Pontoise.
- ASSIÉ S. (2004).** Durabilité des bétons autoplaçants, thèse de doctorats de l'institut nationale des sciences appliquées de Toulouse, 254 pages.
- ASTM C. (2005).** Standard test method for determining age of cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, 1585 –04.
- AUDENAERT K., DE SCHUTTER G. (2003).** “ Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete ”, Proceedings (SP 212) of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Greece, pp.451-465.

B

- BALLIVY G. (1999).** “Relation between ITZ transport properties and durability of cementitious composites”, Report 20: “ Engineering and transport properties of the Interfacial Transition Zone in cementitious composites ”, Rilem Publications, France.
- BANTHIA N., TROTTIER J. (1994).** “Concrete reinforced with deformed steel fibers, part I: bondslip mechanisms” ACI Materials Journal, V.91, No.5, pp. 435-444.
- BARON. J., OLLIVIER J.P. (1996).** "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Éditions Eyrolles.
- BEHIM M. (2005).** Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'EL HADJAR dans les matériaux à matrice cimentaire, Thèse de doctorat d'état en cotutelle Université d'Annaba – INSA de Toulouse, pp 187.

- BEHIM M., CYR M et CLASTRES P. (2011).** Physical and chemical effects of El Hadjar slag used as an additive in cement-based materials, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol.15, n° 10, p.1413-1432.
- BENSEBTI SALAH EDDINE. (2008).** Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux thèse de doctorat d'université Mentouri-Constantine.
- BESSA-BADREDDINE A. (2004).** Étude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France.
- BILLBERG P. (1999).** Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience, CBI report, vol.2, n° 99, p.80.
- BLEDZKI A. K and GASSAN J. (1999).** Composites reinforced with cellulose based fibers. ELSEVIER, *Progress in polymer science*, volume 24, pp.221-274.
- BOUKNI B. (2007).** Tenue au feu des bétons autoplaçants, Thèse de magister, université mentouri, Constantine.
- BOULEKBACHE B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S. (2009).** Influence de la rhéologie des bétons renforcés de fibres métalliques sur leurs propriétés mécaniques. 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran (Algeria).
- BUIL M., OLLIVIER J-P. (1993).** « Conception des bétons : structure poreuse », la durabilité des bétons. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, p 106.

C

- CARLS WARD and al. (2003).** Effect of constituents on the workability and rheology of selfcompacting concrete, *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*, Reykjavik, Islande, pp 143-153.
- CASANOVA P. (1996).** “Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure”.
- CHABIL HOCINE. (2009).** Confection d'un Béton Autoplaçant à base de matériaux locaux, Université El-Hadj Lakhdar de Batna, page 2.
- COTTERELL B., MAI Y.W. (1996).** “Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie Academic & Professional”, London/Chapman and Hall. p. 294.
- COUTTS., R.S.P. (1983).** Flax fibers as a reinforcement in cement mortar ?, *the international journal of cement composites and lightweight concrete*, vol.5 N°4, pp 257-262.
- CUSSIGH SONEBI et DE SCHUTTER. (2003).** *Project testing SCC-segregation test method*, *Proceedings of the third international RILEM conference on SCC*, Reykjavik, Islande, pp 311-322.
- CYR M., MOURET M. (2003).** Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures: Consequences on SCC design, *Proceedings of the*

Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, pp. 241-255.

D

DE LARRARD F et ROY R. (1992). « Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », *Matériaux et Constructions*, 25, pp. 464-475.

DE LARRARD F., FERRARIS C F., SEDRAN T. (1998). Fresh concrete: A Herschel Bulckley material, Technical note, *Materials and Structure*, 31 (211), pp. 494-498.

DE LARRARD F et SEDRAN T. (1999). Une nouvelle approche de la formulation des bétons, Laboratoire centrale des ponts et chaussées, Centre de Nantes, France.

DE SCHUTTER G., DOMONE P., GIBBS J. (2008). Self-Compacting Concrete, Whittles Publishing, 288 pp, ISBN 978-1904445-30-2.

DHONDE H.B., Mo Y.L., HSU T.T.C. (2005). “Fiber Reinforcement in Prestressed Concrete Beams”, Technical Report 0-4819-1. Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration Project 0-4819 Department of Civil & Environmental Engineering University of Houston, Texas.

DIEDERICH, P. (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaire sur le comportement autoplçant du béton. Thèse de doctorat INSA, Toulouse, France.

E

EFNARC. (2002). Specifications and guidelines for self-compacting concrete, 32 pages.

EL BARAK, M. (2005). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des BAP à l'état frais. Thèse de doctorat, Université Toulouse III, France. 220p.

EL HILALI ABDELLAH. (2009). Étude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplçants (BAP): Influence des fines calcaires et des fibres végétales, Thèse doctorat, université de Cergy Pontoise. 118p

EMBORG. (1999). Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production, Proceedings of the First international RILEM Symposium, Stockholm, pp 95-105.

G

GIBBS J.C and ZHU W. (1999). “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.

GRANIFIBRES. (2007). Notice technique, fibre en polypropylène.

GROTH P. (2000). “Fiber reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on selfcompacting concrete and energetically modified binders, PhD-thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Luleå University of Technology.

GROTH P., NEMEGEER D. (1999). “The use of steel fibres in self-compacting concrete”, First Int. Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Skarendahl and Petersson, RILEM publications PRO 7, Cachan, pp. 497-508.

GRÜNEWALD S., WALRAVEN J.C. (2003). "Rheological measurements on self-compacting fibre reinforced concrete", Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Islande, pp. 49-58.

GRUNEWALD 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, pp. 1793-1798.

GRUNEWALD S., WALRAVEN J.C. (2001). “Maximum content of steel fibres in self-compacting concrete”, proceeding of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete.

H

HAMEED R. (2010). Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques, thèse de doctorat, université de Toulouse.

HOLMER. S and VAHAN. A. (1999). "Transition zone studies of vegetable fibre cement paste composites», Cement and concrete composites 21, pp 49-57.

J

JIN. (2002). Properties of mortar for self-compacting concrete, PhD thesis de l'Université de Londres, 398 pages.

K

KAROUITE A. (2003). Choix et caractérisation des matériaux, Utilisation des cendres volantes pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, école HASSANIA des Travaux publics.

KAWAMATA A., MIHASHI H., FUKUYAMA H. (2000). “Flexural failure properties of hybrid fiber reinforced cementitious composites”, proceeding of AIJ Tohoku Chapter Architectural Research Meeting, No.63, 69-72.

KAWAMATA A., MIHASHI H., FUKUYAMA H. (2003). “Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement-based Composites”, journal of advanced concrete technology vol.1, No.3, 283-290.

KHENFER. M (1990). Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques". Thèse de doctorat, université de Bordeaux.

KRIKER. A (2005). "Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud et sec", Thèse de Doctorat d'État, ENP, pp 166.

L

LOUKILI. A and TURCRY. PH. (2003). Effect of a viscosity agent on mechanical properties of selfcompacting concrete. In Proceedings of the Conference ICPCM A new era of buiding.

M

MARKOVIC I., WALRAVEN J.C., VAN MIER J.G.M. (2003). "Self-compacting hybrid-fibre concretemix design", workability and mechanical properties, 3 rd International Symposium on Self- Compacting Concrete. Reykjavik, Iceland.

MERZOUZ M., DHEILLY R.M., GOULLIEUX A., QUENEUDEC M. (2008). 'Optimisation of Lignocellulosic Composite formulated with a local ressource : The Diss (Ampelodesma mauritanica)', Proceeding of the 7th International Congress, Dundee Scoltand, U.K, Edition IHS BRE presse, ISBN-13: 978-1-84806-037-1, 651-660.

N

NA 442. (2005). Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

NF EN 1008. (2003). Eau de gâchage pour bétons -Spécifications d'échantillonnage, d'essais de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton (indice de classement : P18-211).

NF EN 12350 – 8. (2010). Béton autoplaçant – essai d'étalement au cône d'Abrams.

NF EN 12350 – 10. (2010). Béton autoplaçant – essai à la boîte en L.

NF EN 12350 – 11. (2010). Béton autoplaçant – essai de stabilité au tamis.

NF EN 206 – 9. (2010). Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.

NF EN 206-1. (2002). « Béton, partie 1 : spécification, performances, production et conformité », Association Française de Normalisation (AFNOR).

NF EN 14651+A. (2007). Mesurage de la résistance à la traction par flexion (limite de proportionnalité, résistance résiduelle), AFNOR.

NF EN 12350-7. (2012). Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air.

NF EN 12390-3. (2012). Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.

NILSON L. (1975). Reinforced Concrete with Sisal. Swedish Council for Building Research, document D14.

O

OKAMURA H., OZAWA K and OUCHI M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 1, 3 –17.

OKAMURA H et OUCHI M. (2003). Applications of self-compacting concrete in Japan, In: *The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, editors, RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, France, p.3-5.

P

PERA J., HUSSON S. and GUILHOT B. (1999). “Influence of finely ground limestone on cement hydration”. *Cement and Concrete Composites*, pp. 99-105.

PETERSSON. (1998). “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.

PETERSSON. (2001). “Limestone powder as filler in self-compacting concrete – Frost resistance and compressive strength”, *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan, pp. 277-284, 23-2.

PNB. (2005). *Projet National BAP, Aide à la rédaction de cahier des charges techniques pour le Bétons Autoplaçants (BAP).*

R

RILEM. (2001). *Self-Compacting Concrete, State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC*, Edited by Skarendahl, A et Petersson, O., RILEM Publications, France.

ROLS S., AMBROISE J and PÉRA J. (1998). Effects of different viscosity agents on the properties of Self-leveling concrete. *Cement and Concrete Research*, 29:261_266.

ROSSI P., ACKER P., MALIER Y. (1987). “Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure”, *Materials and structures*, vol.20 pp. 436-439.

ROUSSEL N. (2007). « The LCPC box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC », accepted for publication in *RILEM Materials and Structures*.

S

SAKATA K. (1998). “Durability of self-compacting concrete and low heat high performance concrete”, *CONSEC 98, International Conference 2*, pp.2057-2064, Tronso, GB.

SAVASTANO Jr. H., AGOPYAN V., NOLASCO A.M. & LIA P. (1999). Reinforced cement components for roofing, *Constructions and Building Materials*, Vol. 13(8), 433 – 438.

SEDRAN T. (1999). *Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants*, Thèse de Doctorat l’ENPC, France.

SELLAMI A. (2015). Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (Diss): Caractérisation, durabilité et application au cas de la maçonnerie. Thèse de Doctorat, université d'Annaba, Algérie.

SHAH P.S. (1991). "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?" ACI Materials Journal, V.88, No.6, pp. 595-602.

SHI and al. (1998). A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste, Transactions of the Japan Concrete Institute, vol 20, pp 9-14.

SHI C., WU Y., SHAO Y and RIEFLER M. (2002). "Comparison of two Design approaches for self consolidating concrete", First North American Conference on the Design and use of Self-Consolidating Concrete, ACBM center, pp. 349-354.

SHI H. S., XU B. W. et ZHOU X. C. (2009). Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete, Construction and Building Materials, vol.23, n° 5, p.1980-1985.

S.G. OH., T. NOGUSHI and F. TOMOSAWA. (1999). "Toward mix design for rhéology of selfcompacting concrete". In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self- Compacting Concrete. RILEM.

SKARENDAHL A. (2003). The present - The future. In : The 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, edited by Wallevik, O. H., Nielsson, I., RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, France, p.6-14.

SKARENDAHL A and PETERSSON O. (2001). "Self-Compacting Concrete. State-of-the-art report of Technical Committee 174-SCC", RILEM Publications, France.

SONEBI M and BARTOS P.J.M. (1999). "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.

SUKONTASUKKUL P. (2004). "Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending", Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep. 2004) pp. 35-41.

SWAMY. R.N. (1986). Properties of high-strength concrete, Cement concrete and aggregates vol.8, N°1, pp.33-41.

SWAMY. R. H. S., AHUJA. B., M. KRISHAMOORTHY. (1984). Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers. The international journal of cement composite and light weight concrete, volume 5, p 13 N°1.

T

THE CONCRETE SOCIETY. (2005). Technical report No.62, Self-compacting concrete : a 196 review, Day RTU, Holton IX, editors, Camberley, UK, Concrete Society, Surrey GU17 9AB, UK.

TOLÈDO F.R.D., GHAVAMI, K., ENGLAN, D.G.L., SCRIVENER, K. (2003). Development of vegetable fibers-mortar composites of improved durability. ELSEVIER, Cement and concrete composite, volume 25, p. 12.

TOLEDO FILHO R.D., GHAVAMI K., SANJAN M.A. & ENGLAND G.L. (2005). Restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres, Cement and Concrete Composite, Vol. 27(5), 534- 544.

TOUTOU Z et al. (2004). Programme expérimental élargi sur la rhéométrie des suspensions a matrice cimentaire, p. 8.

TOUTOU Z et al. (2005). Rhéologie des bétons autoplaçants et évaluation de la thixotropie, Laboratoire central des ponts et chaussées, pp 15 – 27.

TURCRY P. (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation, thèse de doctorat. École Centrale de Nantes et Université de Nantes.

U

UTSI, EMBORG., CARLSWARD. (2003). Relation between workability and rheological parameters, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 154-164.

W

WALLEVIK. (2003). Rheology-A scientific approach to develop self-compacting concrete, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Reykjavik, Islande, pp 23-31.

Y

YAHIA A., TANIMURA M et SHIMOYAMA Y. (2005). Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", Cement and concrete Research, 35 [3], pp. 532-539.

Z

ZHANG X., HAN J. (2000). The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, Cem Concr Res, 30 [5], pp. 827-830.

ZHU W et GIBBS J.C. (2005). Use of different limestone and chalk powders in self compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol.35, n° 8, p.1457-1462.

ZHU W., QUINN J., BARTOS P.J.M. (2001). “ Transport properties and durability of self-compacting concrete ”, Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458, 23-25.

ANNEXE A

**EFFET DES FIBRES DE DISS SUR LES
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
DU MORTIER**

Tableau 1. Formulation des mortiers

Mortier	Sable	Eau	Ciment
MT	1500g	250g	500g
MFD ₁	1500g	250g	500g
MFD ₂	1500g	250g	500g
MFD ₃	1500g	250g	500g

MT : Mortier témoin (sans fibre).

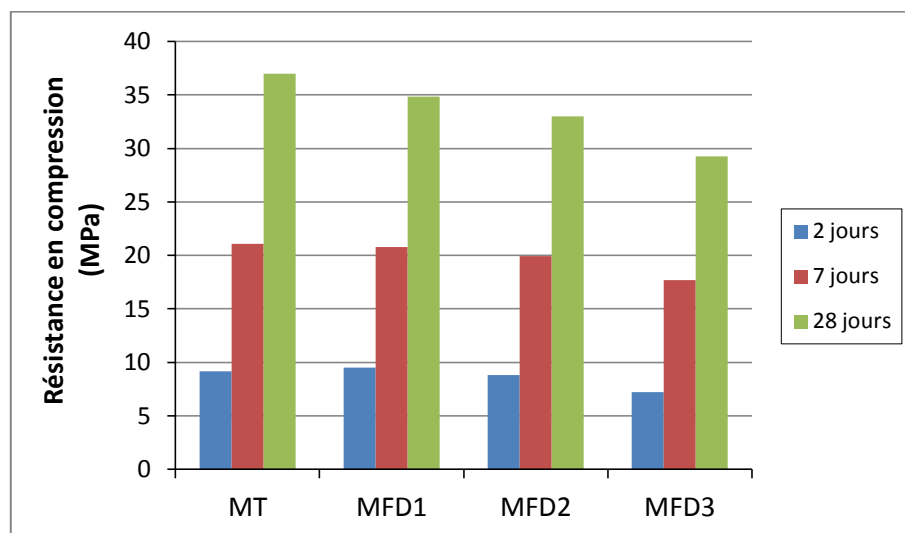
MFD₁ : Mortier avec 800g/m³ de fibre de Diss

MFD₂ : Mortier avec 1600g /m³ de fibre de Diss

MFD₃ : Mortier avec 2400g /m³ de fibre de Diss

- La longueur des fibres est fixée à 12 mm.

- Selon la fiche technique des fibres de polypropylène (Annexe B), il faut doubler le dosage des fibres pour le mortier et pour garder le même volume, nous avons utilisé la même procédure pour étudier l'effet des fibres de diss sur les caractéristiques mécaniques du mortier de dimension 4x4x16 cm (figure 1 et 2).

**Figure 1.** Effet des fibres de Diss sur la résistance en compression du mortier

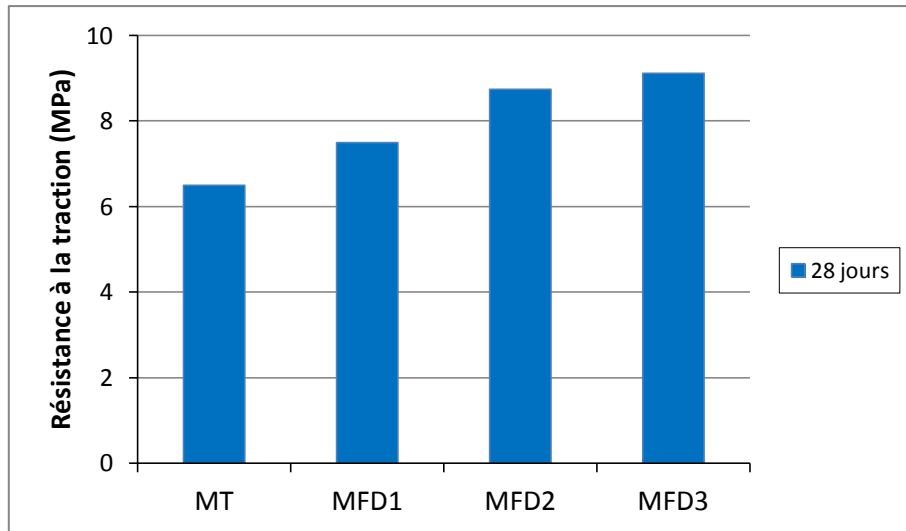


Figure 2. Effet des fibres de Diss sur la résistance en traction par flexion du mortier

Ensuite, nous avons étudié l'influence de trois différentes longueurs de fibres de Diss sur la résistance en compression et en traction par flexion du mortier (figure 3 et 4).

- Le dosage optimal des fibres de diss est fixé à 1600g/m^3 .

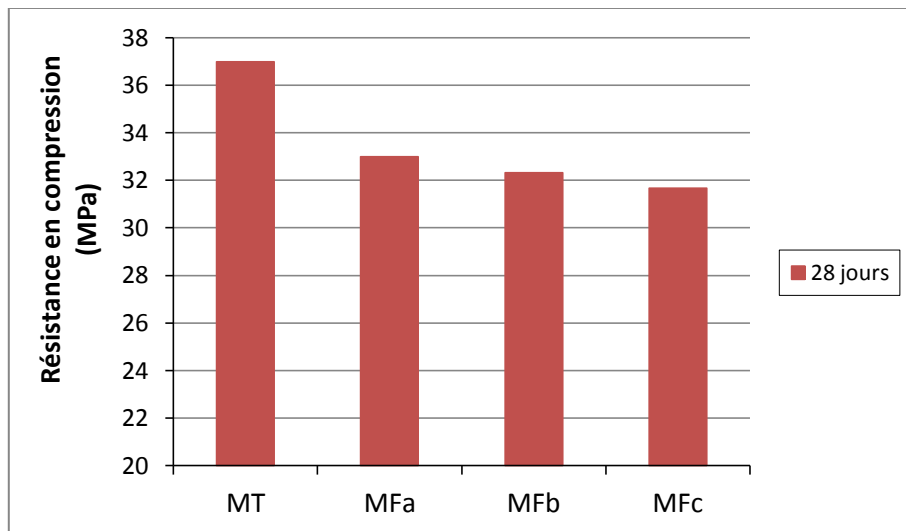


Figure 3. Effet de la longueur des fibres de Diss sur la résistance en compression du mortier

MT : Mortier témoin (sans fibre).

MFa : Mortier avec fibre de Diss (12 mm de longueur).

MFb : Mortier avec fibre de Diss (20 mm de longueur).

MFc : Mortier avec fibre de Diss (30 mm de longueur).

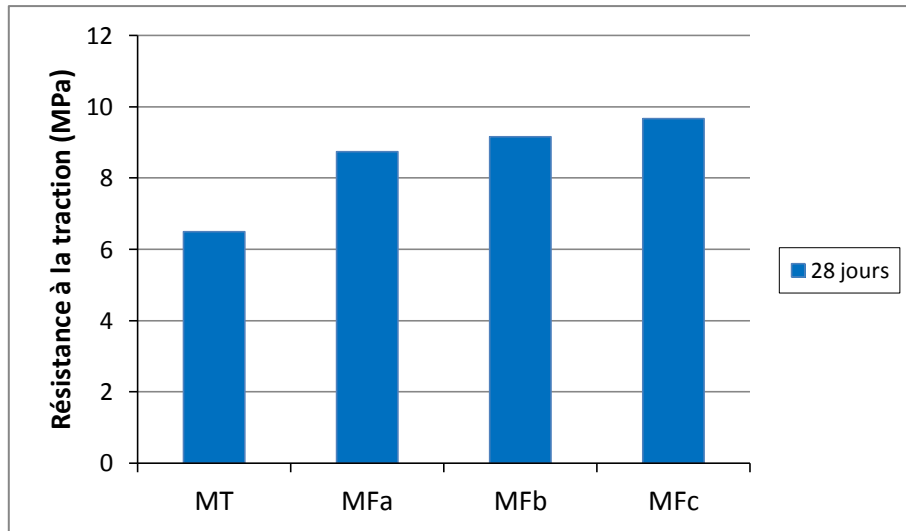


Figure 4. Effet de la longueur des fibres de Diss sur la résistance en traction par flexion du mortier

Les figures 5 et 6 présentent l'effet des fibres de Diss bouillies et non bouillies sur la résistance en compression et en traction du mortier de dimension 4x4x16 cm à 28 jours de durcissement.

- On a utilisé des fibres de Diss avec une longueur de 12 mm et un dosage optimal de 1600g/m³.

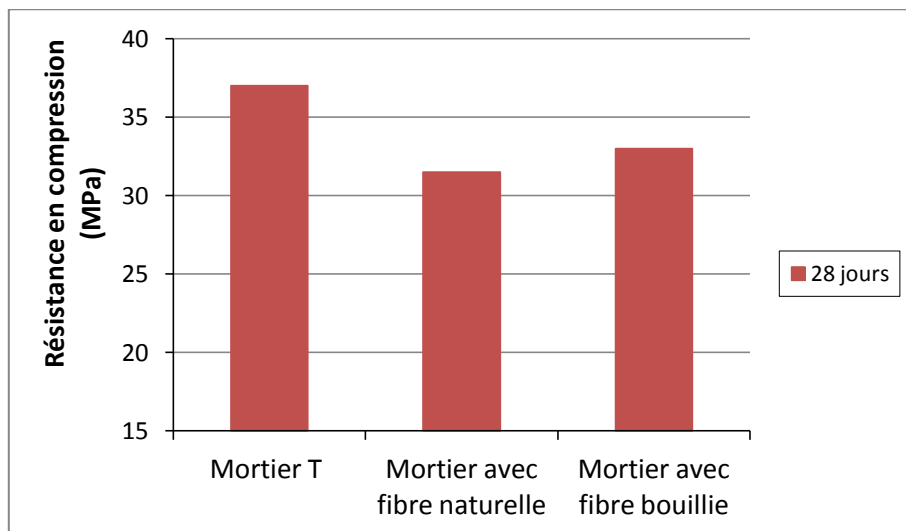


Figure 5. Effet des fibres de Diss bouillies et non bouillies sur la résistance en compression du mortier

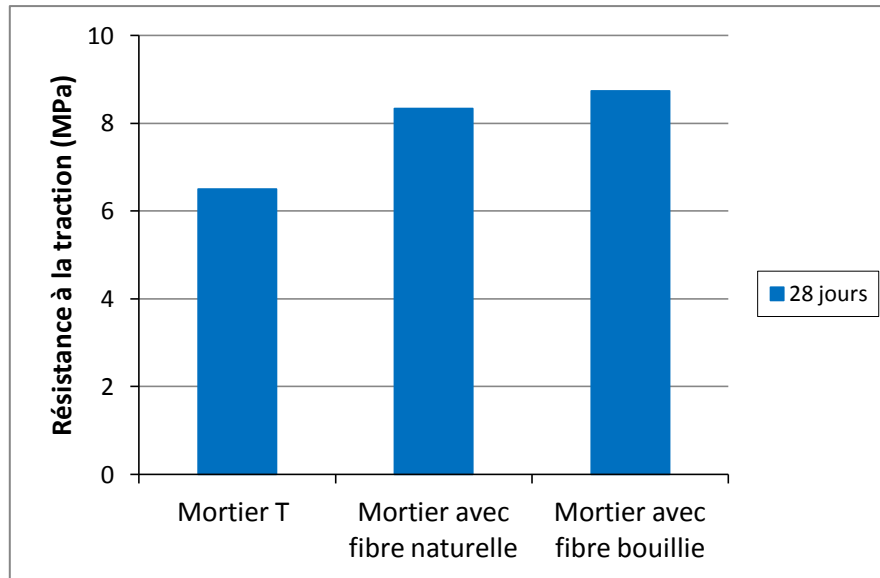


Figure 6. Effet des fibres de Diss bouillies et non bouillies sur la résistance en traction par flexion du mortier


ANNEXE B
FICHES TECHNIQUES

Notice technique
Edition Mars 2008
Numéro 1.60
Version n°133.2006
SIKA VISCOCRETE® 3045

SIKA VISCOCRETE® 3045

Plastifiant/Réducteur d'eau de nouvelle génération pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la Norme NF EN 934-2 Tab. 1 et 2

Présentation	SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.
Domaines d'application	<p>SIKA VISCOCRETE 3045 permet d'obtenir un long maintien de rhéologie (>1H30). Il est donc parfaitement adapté à l'industrie du BPE et à l'utilisation sur chantier.</p> <p>SIKA VISCOCRETE 3045 permet la fabrication de :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ bétons plastiques à fluides, ■ bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice, ■ bétons pompés sur longues distances. <p>Dans les bétons fluides, SIKA VISCOCRETE 3045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.</p>
Caractères généraux	<p>SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau qui confère au béton les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ haute réduction d'eau, ■ maintien prolongé de la rhéologie, ■ robustesse vis-à-vis de la ségrégation, ■ bel aspect de parement au décoffrage.
	
Caractéristiques	
Aspect	Liquide marron/ vert.
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fût de 250 kg ■ Conteneur perdu de 1110 litres ■ Vrac
Stockage	<p>Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.</p> <p>En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.</p>
Conservation	6 mois dans son emballage d'origine intact
Données techniques	
densité	1,11 ± 0,02



pH	5 ± 1
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 2,5 %
Extrait sec	36,4 ± 1,8 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,25 à 2,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKA VISCOCRETE 3045 : 0,3 % à 0,8 %.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE 3045 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair.
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus
Alger/ ALGERIE
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84
213 (0) 21 50 16 92 à 95
Fax: 213 (0) 21 50 22 08
Email: sika.commercial@dz.sika.com



GRANIFIBRES

Fibres en polypropylène

DESCRIPTION

GRANIFIBRES sont des fibres en polypropylène qui sont ajoutées dans le béton pour réduire les fissurations et le faïençage des bétons et mortiers. Les chapes réalisées avec l'addition du **GRANIFIBRES** présentent de meilleures résistances à l'abrasion et aux chocs.

PROPRIETES

La dispersion des fibres dans le béton ou mortier crée un réseau fibré haute densité, ainsi :

- Elles améliorent la cohésion à l'état frais
- Elles réduisent les fissurations de retrait et le <cracking>
- Très bonne résistance aux milieux alcalins
- Très bonne résistance aux chocs, pouvant atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celle du témoin
- Très bonne résistance à l'abrasion

DOMAINES D'UTILISATION

- Hangars de stockage
- Ateliers mécaniques
- Revêtements extérieurs
- Couloirs de circulation
- Parkings...

CARACTERISTIQUES GENERALES

- Longueur de la fibre.....12 mm
- Densité.....0.9 g/cm³
- Point de fusion.....150°C
- Module de Young.....3KN / mm²
- Allongement à la rupture.....50%
- Section de la fibre.....30 microns

MODE D'EMPLOI

La quantité de **GRANIFIBRES** est ajoutée directement dans le malaxeur avec les composants du béton mais jamais dans l'eau.

Si **GRANIFIBRES** est utilisé en dose, prolonger le malaxage encore 5 min. afin de faire dissoudre le sachet.

Pour les mortiers de granulométrie inférieure à 10 mm, il est préférable d'ajouter la quantité de fibres manuellement.

Consommation :

Un sachet de 600 grammes par mètre cube de béton.
Deux sachets de 600 grammes par mètre cube de mortier.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Cartons de 40 doses de 600 g en papier soluble et en sachet non soluble de 600 g pour mortier

A stocker à l'abri de l'humidité.

Durée de conservation :

3 ans dans son emballage d'origine.

PRECAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

