

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté Des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par :

TABET Nesrine

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

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physico-chimie des Matériaux Minéraux

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA NATURE ET DES
DIMENSIONS DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT PHYSICO- MECANIQUE
DES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES (BAPF)

Devant le jury composé de :

Mr AYADI Azzedine	Professeur	U.M.B.B	Président
Mr CHAID Rabah	Maître de conférences/A	U.M.B.B	Examineur
Mr GHERNOUTI Yousef	Maître de conférences/A	Univ.Mascara	Examineur
Mr TAZROUT Mansour	Maître de conférences/B	U.M.B.B	Examineur
Mr BENMOUNAH Abdelbaki	Maître de conférences/A	U.M.B.B	Promoteur

Année Universitaire 2011/2012

Remerciements

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Mr A.

***BENMOUNAH**, pour, sa disponibilité et ses conseils qui ont permis de mener à bien ce travail.*

*J'exprime également ma gratitude envers Mr A. **BELLAL** co-directeur de thèse pour ses aides, sa collaboration aussi efficace qu'agréable tout le long de ce travail.*

*Mes sincères remerciements se dirigent vers Monsieur le professeur A. **AYADI** d'avoir accepté d'être le président de jury pour ce mémoire de thèse.*

*Je remercie aussi les Maîtres de Conférences Mr **R. CHAID** et Mr **Y. GHERNOUTI**, Mr **M.TAZROUT** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être mes examinateurs*

Un grand merci aux personnels de CETIM, de boumerdes pour leur aide et leur soutien.

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Partie théorique	
Chapitre01:béton autoplaçant	
1. Historique	03
2. Définition	03
3. Les avantages des BAP	04
4. Concept d'un BAP	04
5. Les constituants d'un BAP.	05
5.1. L'eau	06
5.2. Les ciments	06
5.3. Les granulats	07
5.4. Les additions minérales	08
5.5. Les superplastifiants	10
5.5.1 Définition	10
5.5.2 Les différentes classes	11
5.5.3 Mode d'action des superplastifiants.	13
5.5.4 La compatibilité ciment adjuvants dispersants	19
5.5.5 Influence des superplastifiants sur l'hydratation des ciments	20
5.6. L'agent colloïdal	20
6. Mode de formulation des BAP	20
6.1. Le cahier des charges minimum à l'état frais	21
6.2. Particularités de la composition des BAP	22
6.3. Quelques points à surveiller	25
7. Pratique actuelle de la formulation des BAP	25
8. Les Approches de formulation des BAP	27
8.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	27
8.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	27
8.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	28
8.4. Méthode basée sur un plan d'expérience	28
8.5. Principe et application des approches	29
1. Approche japonaise	29
2. Approche suédoise	31
3. Approche française	31
4. La méthode LGC	32
9. Les propriétés principales d'un BAP	37
9.1. Capacité de remplissage	37
9.2. Résistance à la ségrégation.	37
9.3. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	38
9.4. Essais de caractérisation rhéologiques des BAP	39
a. L'essai d'étalement	39
b. Essai à la boîte en L	40
c. Essai de stabilité au tamis	41
d. L'essai d'étalement modifié	41
e. Essai de l'entonnoir	42

SOMMAIRE

<i>f. Essai de boîte en U</i>	42
<i>10. Propriétés du béton à l'état durci</i>	43
<i>11. Mise en œuvre des BAP</i>	46
Chapitre02: le béton fibré	47
<i>Introduction</i>	47
<i>I. Les fibres</i>	47
<i>1. Introduction</i>	47
<i>2. Les différents types de fibres.</i>	48
<i>a. Fibres métalliques</i>	49
<i>b. Fibres de fonte amorphe</i>	49
<i>c. Fibres de verre</i>	49
<i>d. Fibres de polypropylènes</i>	49
<i>3. Propriétés mécaniques des fibres</i>	49
<i>4. Critères de choix des fibres</i>	50
<i>II. Composition d'un béton fibré</i>	52
<i>1. La formulation d'un béton fibré</i>	52
<i>2. Le béton renforcé de fibres en phase d'hydratation</i>	53
<i>2.1. Hydratation du ciment</i>	53
<i>2.2. Porosité</i>	55
<i>2.3. Effet des additions minérales, granulats, fibres</i>	56
<i>2.4. Influence du dosage en fibres</i>	57
<i>5. Orientation préférentielle des fibres</i>	59
<i>6. Role des fibers</i>	60
<i>7. Principe d'action des fibres</i>	61
<i>8. Comportement mécanique des bétons renforcés de fibres</i>	62
<i>9. Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres</i>	67
Chapitre 03:les bétons autoplaçants fibrés (BAPF)	68
<i>1. Introduction</i>	68
<i>2. Les propriétés des BAPF à l'état frais</i>	68
<i>a. Essai d'étalement</i>	68
<i>b. Essai de V- funnel</i>	70
<i>c. Essai J-RING</i>	70
<i>3. Orientation et distribution des fibres</i>	71
<i>4. Comportement mécaniques des bétons autoplaçants fibrés</i>	73
<i>4.1. Comportement à la flexion</i>	73
<i>4.2. Comportement a la compression et a la traction.</i>	74
<i>4.3. Le retrait.</i>	75
<i>5. Utilisation des BAP fibrés dans les structures</i>	75
Partie Expérimentale:..	
<i>I. Méthodologie et objectif du travail</i>	79
<i>II. Description des matériaux utilisés</i>	80
<i>Granulats</i>	80
<i>Ciment</i>	86
<i>Fines</i>	88
<i>Superplastifiant</i>	88

SOMMAIRE

<i>Les fibres III. Chaleur d'hydratation</i>	90
<i>IV. Etude rhéologique sur la pâte du ciment</i>	92
<i>V. Formulation</i>	95
<i>1. Formulation d'un BAP par la méthode LGC</i>	100
<i>I-Les essais sur le BAP à l'état frais</i>	103
<i>II-Les essais sur le BAP à l'état durci</i>	105
<i>2. Formulation d'un BAPF par la méthode LGC</i>	106
<i>I-Influence de la longueur des fibres sur les propriétés des BAP</i>	107
<i>II-Influence de la nature des fibres sur les propriétés des BAP</i>	108
<i>III-Influence de l'hybridation des fibres (longueur –nature) sur les propriétés des BAP</i>	112
<i>5. Analyse et discussion des résultats obtenus</i>	115
<i>6. Etude de retrait</i>	117
<i>7. Modélisation d'un BAP fibrés par le modèle de SARGIN</i>	129
<i>VI. Conclusion</i>	132
<i>ANNXE</i>	138

Résumé

Dans la plupart des cas, les bétons autoplaçants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un type de fibre. L'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes et des dosages appropriés peut potentiellement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant. La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation ou mixage est étudiée dans ce mémoire pour des bétons autoplaçants. Des mélanges mixtes ou hybrides ont été formulés avec des fibres d'acier et de verre de différentes longueurs et dosage. Des essais de ténacité en flexion ont été réalisés et les résultats ont été intensivement analysés. Se basant sur divers arrangements (combinaisons), l'étude met en évidence l'aspect qualitatif des fibres pour améliorer les performances du composite fibré.

En premier lieu les travaux s'attardent à évaluer l'effet des fibres sur la maniabilité et à rechercher des relations entre les divers essais rhéologiques. Pour y parvenir, un questionnement est fait sur la signification des divers tests existants et sur l'effet probable des fibres sur la rhéologie. Une matrice complète d'expérimentation a ensuite été effectuée pour évaluer la maniabilité réelle des BAPF. Comme deuxième étape une emphase a été portée sur l'évaluation des résistances mécaniques des BAPF. Les résultats ainsi recueillis sont analysés en détail pour chaque test et ensuite de manière globale pour faire ressortir les meilleurs mélanges de béton

Mots clés : béton autoplaçant, fibres métalliques, fibres de verre, méthode LGC, rhéologie

Abstract :

In most cases, fiber reinforced self-compacting concrete (FRSCC) contains only one type of fiber. The use of two or more types of fibers in a suitable combination may potentially not only improve the overall properties of self-compacting concrete, but may also result in performance synergy. The combining of fibers, often called hybridization, is investigated in this paper for a cementitious matrix. Control, single, two fibers hybrid composites were cast using different fiber type steel and glass with different sizes.

Flexural toughness tests were performed and results were extensively analyzed to identify synergy, if any, associated with various fiber combinations. Based on various analysis schemes, the paper identifies fiber combinations that demonstrate maximum synergy in terms of flexural toughness.

Initially work is delayed to evaluate the effect of fibres on the workability and to seek relations between the various rheological tests. For that purpose a question is made on the significance of the various existing tests and on the probable effect of fibers on rheology.

A complete matrix of experimentation was then carried out to evaluate the workability of the SCCF. Like second stage an emphasis was related to the evaluation of the mechanical resistances of the SCCF. The results thus collected are analyzed in detail for each test and then in a total way to emphasize the best mixtures of concrete.

Key words : self-compacting concrete ,glass fibres, LGC method , rhéologie

ملخص

-في معظم الحالات الخرسانة ذاتية التوضع المدعمة بالالياف لا تحتوي سوى نوع واحد من الالياف استعمال نوعين او اكثر باطوال و كميات مختلفة يستطيع التحسين و بشكل كبير من خصائص هذه الخرسانة.

-الجمع بين الياف ذات انواع و اطوال مختلفة في خرسانة واحدة ذاتية التوضع هو موضوع هذا العمل -انجزت عدة خرسانات ذاتية التوضع مدعمة بالياف حديدية و اخرى زجاجية باطوال و كميات مختلفة اين خضعت لعدة تجارب في حالتها السائلة و الصلبة و تم تحليل النتائج تحليلا مفصلا

-الدراسة اخذت بعين الاعتبار العنصر النوعي للالياف في تحسين الحالة الميكانيكية للخرسانة الناتجة.

-في الجزء الاول من المذكرة تقدم حوصلة للاعمال المنشورة في مجالي التصميم و التخصيص لهذا النوع من الخرسانة

في الجزء الثاني من هذا العمل نقدم بحثا تجريبيا حول كيفية تصميم الخرسانة ذاتية القوالب اقيمت دراسة حول خرسانات ثنائية الالياف حيث استعملت الياف معدنية و اخرى زجاجية بكميات و اطوال مختلفة

الخرسانات الناتجة عرضت لعدة تجارب في حالتها السائلة و الصلبة لمعرفة تأثير عاملي نوع و طول الالياف في تحسين خصائصها

الكلمات الياف معدنية زجاجية, الالياف الحالة الميكانيكية للخرسانة . الخرسانة ذاتية التوضع المفتاحية

LISTE DES FIGURES

- Figure 01 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un (BAP)
- Figure 02 : Effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement du mortier
- Figure 03 : Les utilisations des superplastifiants
- Figure04 : Différentes classes des superplastifiants
- Figure 05: Schéma général des co-polymères.
- Figure 06: Représentation schématique de la formule de polycarboxylate
- Figure07: Schéma des forces exercées entre un ensemble de particules de ciment sur lesquels sont adsorbés des copolymères de polycarboxylates avec des chaînes PEO
- Figure 08 : Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique
- Figure 09 : Evolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polysulfonate
- Figure 10 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.
- Figure 11 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.
- Figure 12 : Evolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de polycarboxylate
- Figure 13 : Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment.
- Figure 14: Compatibilité ciment/superplastifiant/sulfate de calcium
- Figure 15 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle
- Figure 16 : Volume de pâte relatif au BAP est différent de BV
- Figure 17: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton
- Figure 18 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides (d'après [hasni 99])
- Figure 19 : Figure 21: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant
- Figure 20 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats(2).
- Figure 21 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité
- Figure. 22 : Recherche du dosage en eau et en superplastifiant
- Figure. 23 : Essai de compactage selon ASTM C29/C29m
- Figure. 24 : Abaques pour la détermination du rapport E_c/C et e/f .
- Figure. 25 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de béton
- Figure 26: Mesure de l'étalement

Figure 27 : Remplissage du béton dans la partie verticale de L-Box et écoulement du béton après l'ouverture de la trappe.

Figure 28 : Mesure du taux de remplissage

Figure 29: Tamis de 5mm + fond - mesure de la laitance

Figure 30 : Essai j-ring (par GTM construction)

Figure 31: Test à l'entonnoir (v-funnel/ orimet)

Figure 32 : Essai à la boîte en u (ou u-box).

Figure 33: Evolution de la résistance mécanique d'un bap

Figure 34 : Comparaison des modules élastiques théoriques de bap et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales

Figure 35 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle Réglementaire et un modèle d'homogénéisation

Figure 36: Retraits des bap b1 ($e/c=0,50$), bap j($e/c=0,43$) et bo0 ($e/c=0,45$)

Figure 37 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques

Figure 38 : Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion

Figure 39 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres

Figure 40 : Processus de fissuration du béton

Figure 41: Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite

Figure 42 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières).

Figure 43 : Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (avec des précautions particulières).

Figure 44: Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée

Figure 45 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction

Figure 46 : Courbe de wöhler

Figure 47 : Quelques signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue

Figure 48 : Processus de couture des micros et des macro fissures

Figure 49 : Effets des fibres sur l'étalement des BAP

Figure 50: L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre .

Figure 51 : L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai v-funnel en fonction du facteur de fibres

Figure 52: Illustration de la consistance de pâtes de ciment renforcées avec des fibres de facteurs d'aspect et concentrations différents

Figure 53: Courbe effort-flèche pour différentes compositions

Figure 54: Comportement à la traction de différentes compositions

Figure 55 : Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplacant fibré (a), Béton armé ordinaire (b)

Figure 56 : Un voussoir à base de BAP fibré

Figure 57: Photographie aux rayons x au milieu du voussoir le long de l'écoulement (a), Perpendiculairement à l'écoulement (b)

Figure 58 : Fibres métalliques

Figure 59 : Calorimètre de Lanvagan

Figure 60 : La variation de la chaleur d'hydratation du ciment en fonction de temps

Figure 61 : La variation de la chaleur d'hydratation du ciment +superplastifiant en fonction de temps

Figure 62 : Viscotester VT550

Figure 63: La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

Figure 64: La variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement

Figure 65 : La variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

Figure 66 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement

Figure 67 : Diagramme d'essai de compactage selon ASTM c29/c29m

Figure 68-1 :Mini cône pour l'essai d'étalement de la pâte.

Figure 68-2 Essai d'étalement de la pâte

Figure 69 : Essai d'étalement et stabilité au tamis

Figure 70 : Essai de flexion à 3 points

Figure 71 : Essai de compression

Figure 72 : Eprouvette après fissuration par flexion

Figure 73 : Etat rhéologiques d'un béton autoplacant fibré par les fibres de verre

Figure 74 :Variation de la résistance à la compression en fonction de longueur des fibres métalliques

Figure75: Variation de la résistance a la flexion en fontion de langueur des fibres métalliques

Figure76 : Variation de la résistance a la compression en fonction de longueur des fibres de verre

Figure77 : Variation de la résistance a la flexion en fonction de langueur des fibres de verre

Figure78 : Variation de la résistance a la compression en fonction de type et langueur des fibres

Figure 79:Variation de la résistance a la flexion en fonction de type et langueur des fibres

Figure 80. : Influence de la nature de fibres sur la résistance a la compression du béton autoplaçant

Figure 81: Influence de la nature de fibres sur la résistance a la flexion du bêton autoplaçant

Figure 82 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance a la compression du béton autoplaçant.

Figure 83 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance a la flexion du béton autoplaçant.

Figure 84: Essai de traction par fendage.

Figure 85:Influence de langueur des fibres sur la résistance a la traction des BAPF.

Figure 86:Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance a la traction du béton autoplaçant.

Figure 87 : Essai de retrait.

Figure 88-Influence des fibres métalliques sur le retrait du béton autoplaçant.

Figure 89- Influence des fibres de verre sur le retrait de béton autoplaçant.

Figure 90 : Diagramme contrainte-déformation.

Figure 91 : Courbe contrainte –déformation pour BAP.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 01 : Composition minéralogique indicative du clinker hydraté
- Tableau 02 : Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAP fibrés
- Tableau 03 : Caractéristiques physiques: (la Norme NF P 18-560)
- Tableau 04 : Analyse granulométrique : Selon la Norme (NF P18-560)
- Tableau 05. Analyse granulométrique du sable de beghlia (NF P18-560)
- Tableau06 : Analyse granulométrique du sable beghlia : Selon la Norme (NF P18-560)
- Tableau 07 : Analyse granulométrique du sable Boussaada (NF P18-560)
- Tableau 08. Analyse granulométrique du sable corrigé : Selon la Norme (NF P18-560)
- Tableau 09. Caractéristiques physiques Gravier 3/8 de SETIF
- Tableau 10 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 : Selon la Norme (NF P18-560)
- Tableau 11: Caractéristiques physiques du gravier 8/15
- Tableau 12. Analyse granulométrique du gravier 8/15 Selon la Norme (NF P18-560)
- Tableau 13. Caractéristiques physiques du ciment ACC
- Tableau 14. Caractéristiques mécaniques du ciment ACC
- Tableau 15. Composition chimique et minéralogique du ciment ACC
- Tableau 16. Composition chimique de filler de calcaire
- Tableau 17: Caractéristiques des fibres métalliques
- Tableau 18: Caractéristiques physiques de la fibre de verre
- Tableau 19 : Caractéristiques chimiques de la fibre de verre
- Tableau 20 : Chaleur d'hydratation du (Ciment+sable normalisé +eau)
- Tableau 21 : Chaleur d'hydratation du (ciment+sable normalisé+superplastifiant+ eau)
- Tableau 22: Densité avant et après compactage des granulats :
- Tableau 23 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode LGC
- Tableau 24 : Caractéristiques rhéologiques du BAP
- Tableau 25: Caractéristiques mécaniques de BAP
- Tableau 26: Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibré (fibres métalliques longues et courtes)
- Tableau 27: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres métalliques

langues et courtes)

Tableau 28 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres de verre langues et courtes

Tableau 29 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres de verre langues et courtes)

Tableau 30 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibrage mixte langue et courtes

Tableau 31: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibrage mixte langue et courtes

Tableau 32 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (hybridation)

Tableau 33: Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants bi fibrés (hybridation):

Tableau 34 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (hybridation)

Tableau 35 : Caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants bi fibrés (hybridation)

Tableau 36 : Module d'élasticité statique et les déformations a la rupture

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau de construction qui trouve pratiquement son champ d'utilisation dans tous les domaines du génie civil. Actuellement, il est sans doute le plus utilisé pour les avantages économiques et techniques qu'il présente.

La tendance actuelle des industriels du béton va de plus en plus vers l'utilisation des bétons autoplacants. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo vers les années 1980.

Les bétons autoplacants ou BAP sont des bétons très fluides, homogènes et stables, ils se mettent en œuvre sans vibration ce qui constitue un grand avantage pour la réalisation des constructions. Un béton autoplacant (BAP) permet de remplir des coffrages complexes où la densité en ferrailage est importante. Pour cela, les BAP doivent avoir des propriétés bien déterminées à l'état frais à savoir la fluidité (étalement au cône d'abrams), la capacité de remplissage (boite en L) et la résistance à la ségrégation (stabilité au tamis). Pour assurer la stabilité rhéologique, l'utilisation des additifs organiques (superplastifiants et agent viscosifiant) et minérales (fines) s'avère nécessaire. Néanmoins, les recherches sur la compréhension du comportement rhéologique des BAP restent toujours d'actualité.

L'objectif d'obtenir un béton autoplacant plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches. La voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier à cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibre dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont aussi la capacité de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie.

Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibres à prévoir dans la formulation du BAP.

Dans la plupart des cas, les bétons autoplacants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un type de fibre. L'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes peut potentiellement non seulement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplacant, mais peut aussi contribuer à un gain conséquent de fibres.

INTRODUCTION GENERALE

La combinaison des fibres qui est souvent appelée hybridation ou mixage est étudiée dans ce mémoire pour des bétons autoplaçants.

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés rhéologiques et mécaniques d'un béton autoplaçant formulé selon une nouvelle méthode (LGC) et renforcé par deux types de fibres (Fibres de verre et fibres métalliques) avec différentes dimensions a fin de voir l'influence de ces fibres sur les propriétés du béton autoplaçant fibré à l'état frais et à l'état durci.

A cet effet ce mémoire est divisé en deux grandes parties ; une partie bibliographique (théorique) et une partie expérimentale.

La première partie relative à la synthèse bibliographique est subdivisée à son tour en quatre chapitres :

- **Le chapitre 1** traite des généralités et des notions sur le béton autoplaçant (BAP) : Constituants, méthodes de formulation, propriétés rhéologiques du BAP.
- **Le chapitre 2** est consacré à une étude sur les bétons fibrés. dont nous exposons ses propriétés mécaniques
- **Le chapitre 3** est consacré à l'étude d'un béton autoplaçant fibré et à son comportement à l'état frais ainsi bien a l'état durci.

La deuxième partie (partie expérimentale) de ce travail, est subdivisée en quatre parties :

- **La première partie** est destinée à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, superplastifiant, fibres, sable et gravier.)
 - **La seconde partie** est consacré a l'étude du comportement rhéologique des pates dont le dosage en ciment, en fines (calcaire) et en eau sont fixés et nous avons fais varier les proportions d'adjuvants (polycarboxylaes) de manière a aboutir une meilleure optimisation des caractéristiques rhéologiques. A cet effet des essais à l'aide d'un viscosimètre à vitesse imposé (VT550) ont été réalisés sur chacune des pates tout en respectant les conditions de continuité et de cisaillement homogène dans la cellule. Les résultats et interprétations des essais effectués sont traités dans le même chapitre.
 - **La troisième partie** traite la formulation d'un BAP et BAP fibré selon la méthode LGC ainsi qu'une caractérisation rhéologique et mécanique des bétons formulés
- Enfin une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus lors de cette étude ainsi que les intérêts techniques qui en découlent. Des recommandations et nouvelles perspectives en termes d'utilisation de telle formulation des BAP fibrés sont proposées.

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1
LES BETONS AUTOPLAÇANTS

1. Historique:

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

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

C'est dans cet ordre d'idées que plusieurs compagnies, centres de recherche et universités dans le monde ont dirigé leur études vers le développement d'une nouvelle gamme de béton qui s'adapte bien à l'état actuel du développement des structures du point de vue théorique et architectural (structure qui se caractérisent par la complexité de leurs modèles, forme variable et courbures multiples et à ferraillements très congestionnés), face à une main d'oeuvre de moins en moins qualifiée engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration de béton surtout au Japon [1].

2. Définition :

Ces nouveaux bétons sont des bétons fluides autoplaçants qui se mettent en place dans les coffrages sans efforts de vibration tout en garantissant des structures résistantes et durables, ce sont des bétons qui contiennent plusieurs combinaisons de matériaux cimentaires et ajouts chimiques.

L'idée de ces bétons a été lancée vers le milieu des années 1980 par les chercheurs de l'université de Tokyo, puis a été reprise rapidement par les grands groupes industriels japonais (Taisei, Kajima, Obayashi,...)[1]

3. Les avantages des bétons autoplaçants :

- l'absence de vibration et donc de nuisances sonores.
- des aspects de surface d'une bonne régularité.
- une diminution de risque de fissuration
- un gain de temps sur les bétonnages.
- une pénibilité fortement réduite pour les maçons.
- une suppression des risques d'accident liés à la manutention de la benne.
- une économie de mains d'œuvres et un meilleur enrobage des armatures.
- une bonne planimétrie du support fini. [1]

4. Concept du béton autoplaçant :

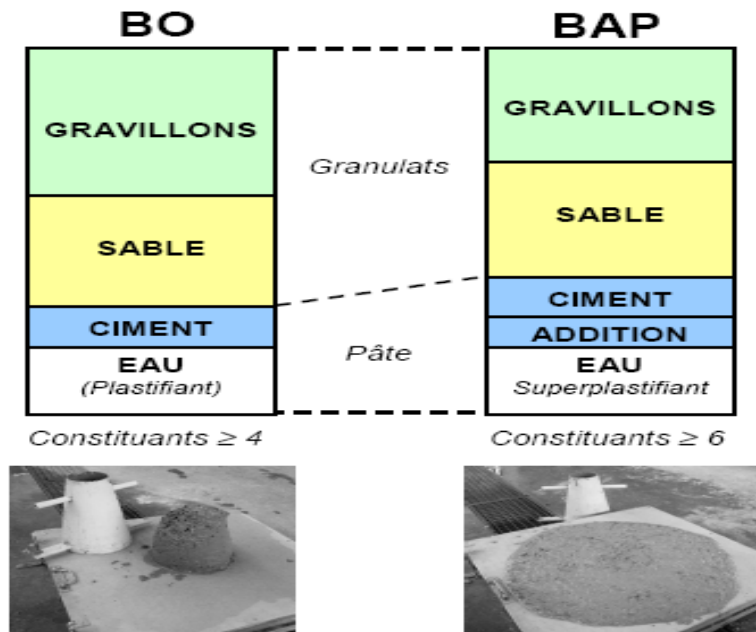
Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [3]

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

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais [4] [5]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure 01). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche.

C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.



**Figure 01 : (a) Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP
(b) Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.**

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre la stabilité et la maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

5. LES CONSTITUANTS D'UN BAP :

❖ Introduction

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

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

Chaque constituant joue un rôle différent dans l'écoulement et dans le comportement rhéologique du béton, et des interactions existent entre certains composants [6]

Ciment et eau :

Les deux constituants principaux de la pâte de ciment, qui constitue la matrice d'un béton sont peu étudiés en tant que facteurs indépendants. Leurs influences sur l'écoulement sont implicitement mises en évidence en se basant sur le rapport E/C. Ce paramètre est très relié aux différentes propriétés des bétons, aux états frais et durci. [6]

5.1. Eau

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

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

Cependant l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. [6]

5.2. Ciment :

Les ciments les plus courants dans le monde du génie civil, sont les ciments à base de clinker Portland, produit obtenu par la cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau, et forme une pâte qui fait prise et durcit progressivement à l'air ou dans l'eau

Le durcissement du ciment est principalement dû à l'hydratation du silicate tricalcique, un composant majeur du clinker. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, en liant les différents constituants. Le clinker est accompagné de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) nécessaire pour régulariser la prise,

Différents types de ciment existent sur le marché, et se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. Ainsi, le choix du type du ciment, est conditionné par les performances souhaitées du béton [7] (résistance à la compression, temps de début de prise, stabilité, retrait, teneurs en chlorures et en sulfates, pouzzolanité, etc.). Du point de vue rhéologique, les propriétés du ciment influant sur l'écoulement de la pâte d'un béton sont principalement la composition minéralogique, la granulométrie et la finesse[8]

Par ailleurs, le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié aux propriétés mécaniques et de durabilité du béton. On considère que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C et malgré l'importance du ciment, l'influence de son dosage sur les propriétés d'écoulement est peu étudiée dans la littérature concernant les BAP.

5.3. Granulats :

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton. Ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm [7] et doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. La nature des roches constituant les gisements est responsable des propriétés intrinsèques (masse volumique, résistance, porosité, réactivité, etc.) des granulats [7]. La granularité et la forme des granulats sont fonction du processus d'élaboration. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés.

Les granulats permettent tout d'abord de réduire considérablement le coût global du béton (cinq fois moins chers que le ciment), mais leur influence est déterminante sur la résistance mécanique du béton à l'état durci. La résistance mécanique du béton dépend fortement de la nature des granulats (propriétés intrinsèques), et de la compacité du squelette global, ainsi que de l'adhérence entre les granulats et la pâte du béton. [9]

Par ailleurs, le dosage des granulats peut avoir une influence sur les propriétés d'ouvrabilité des bétons. Pour obtenir un béton autoplaçant, le volume du gravier et la taille maximale des granulats ont été réduits pour réduire les frictions et éviter les blocages dans des zones confinées.

5.4. Additions minérales :

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières. Ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau qui proviennent principalement de l'industrie. Ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

➤ **Avantages économiques et environnementaux :**

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple). Ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO_2 de l'industrie cimentière dans la nature.

➤ **Avantages techniques :**

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci ; elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons. En raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [11]. Cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

➤ **Filler calcaire :**

Ils sont élaborés à partir de matériaux calcaires, de dolomites ou de calcites finement écrasés. Ce sont de bons correcteurs de courbes granulométriques utilisés aussi pour augmenter la quantité de fines. La taille dans une gamme inférieure à 0,125mm sera un très grand avantage. De nature inerte, le filler calcaire semble avoir une faible influence sur la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de viscosité du mélange cimentaire

Ceci peut justifier l'utilisation de cette addition à dosages élevés dans la formulation des bétons (BAP et BHP). Cependant, plusieurs auteurs ont remarqué que, pour un dosage constant en ciment (ou un rapport E/C constant), l'ajout du filler calcaire contribue à diminuer la viscosité d'une pâte de ciment (malgré l'augmentation de la concentration volumique en solides), avant de provoquer une augmentation de la viscosité lorsque son dosage dépasse une certaine valeur critique, qui dépend du rapport E/C [12] [17]. Yahia et al [17] montrent qu'à chaque rapport E/C correspond un dosage optimum en filler calcaire qui peut assurer un écoulement optimal du mélange cimentaire. La figure 02 montre l'évolution de l'écoulement (représenté par l'étalement relatif et la vitesse relative d'écoulement) des mortiers à différents dosages en filler calcaire.

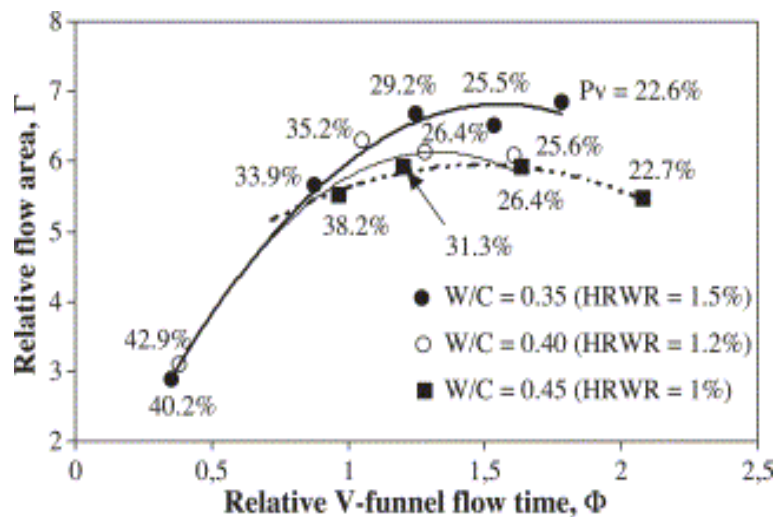


Figure 02 : effet du dosage en filler calcaire sur l'écoulement en fonction du rapport E/C du mortier [17]

Les auteurs expliquent que les particules fines du filler calcaire 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 [17]. Par conséquent une quantité de l'eau qui occupait ces vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Au delà du dosage critique, la viscosité du mortier augmente avec l'ajout du filler calcaire. En effet, les auteurs considèrent que le mortier atteint sa compacité maximale lorsque le dosage critique en filler est atteint [17]; au delà de ce dosage les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

5.5. Superplastifiants :

5.5.1. Définition :

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent de modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. L' utilisation de superplastifiants nous permet d' obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation. [68]

En tant qu'adjuvant, le superplastifiant peut avoir plusieurs fonctions dans un mélange cimentaire. La fonction de base est la fluidification, puisqu'il provoque un important gain d'ouvrabilité d'un mélange. Le superplastifiant est responsable d'un effet de plastification : à même teneur en eau, il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme de la pâte, du mortier ou du béton. La fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité. Ceci permet donc d'augmenter les performances mécaniques du mélange. [6]

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur **Figure 3** permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [68].

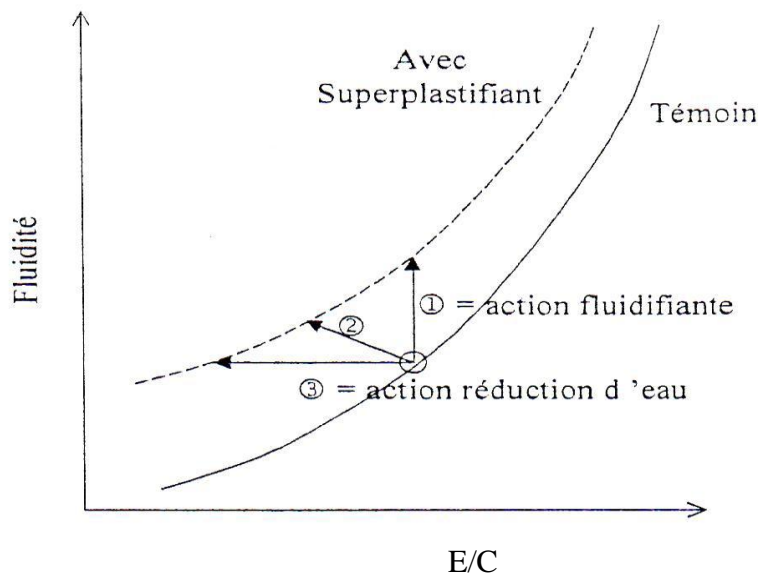


Figure 3 : Les utilisations des superplastifiants

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

5.5.2. Les différentes classes :

Les superplastifiants sont des polyélectrolytes organiques, appartenant à la catégorie des dispersants polymériques. [18]

Les superplastifiants sont généralement classés en quatre groupes :

Les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS) (Figure 4-1),

Les polycondensats de formaldéhyde et de naphthalène sulfoné (PNS) (Figure 4-2),

Les lignosulfonates modifiés (MLS) (Figure 4-3) et les autres incluant les esters d'acides sulfoniques, les polyacrylates et les polycarboxylates (Figure 4-4).

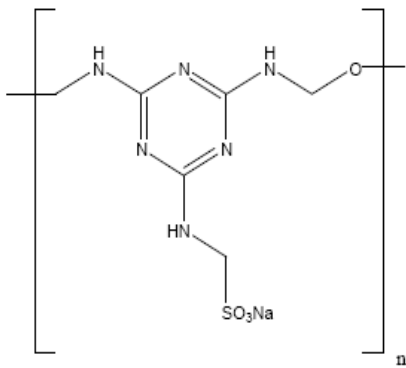


Figure 4-1 :PMS

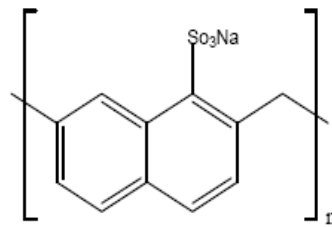


Figure 4-2 :PNS

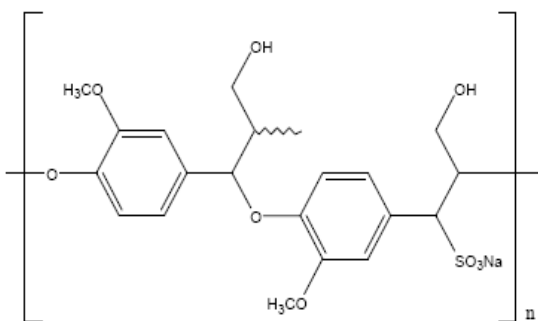
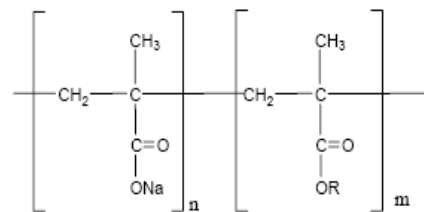


Figure 4-3 :lignosulfonate modifié



R=oxyde d'éthylene par exemple

Figure 4-4 Polycarboxylae

Figure4 : déférentes classes des superplastifiants

❖ **Les polycarboxylates :**

En 1980, l'apparition des Polycarboxylates nommés PC est une grande évolution des super réducteurs d'eau. Ils sont formés d'une combinaison de polymères dont le mécanisme de dispersion se fait par une répulsion combinée électrostatique et stérique. [23]

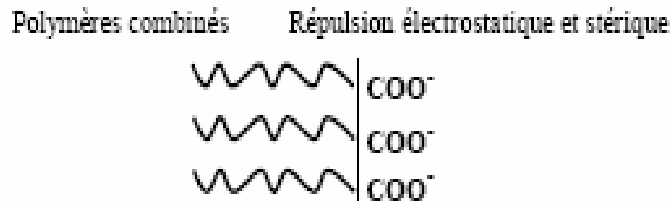


FIG. 5: Schéma général des co-polymères.

Le groupement fonctionnel est formé d'acides méthacryliques ou acryliques avec un groupe actif anionique COO⁻ (plus efficaces par rapport aux sulfonates), et qui a été partiellement estérifié avec plusieurs chaînes latérales de Polyoxyde d'Ethylène (notées PEO)

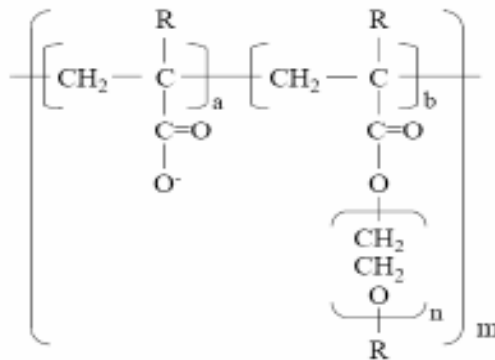


FIG. 6: Représentation schématique de la formule de polycarboxylate (PC) [Hasni 99].

R représente H ou un groupe alkyle.

La répulsion stérique est due aux chaînes de PEO qui permettent une plus forte dispersion des particules de ciment.

Flatt [24] montre le décalage des forces interparticulaires lorsque les particules se repoussent par l'action du co-polymère

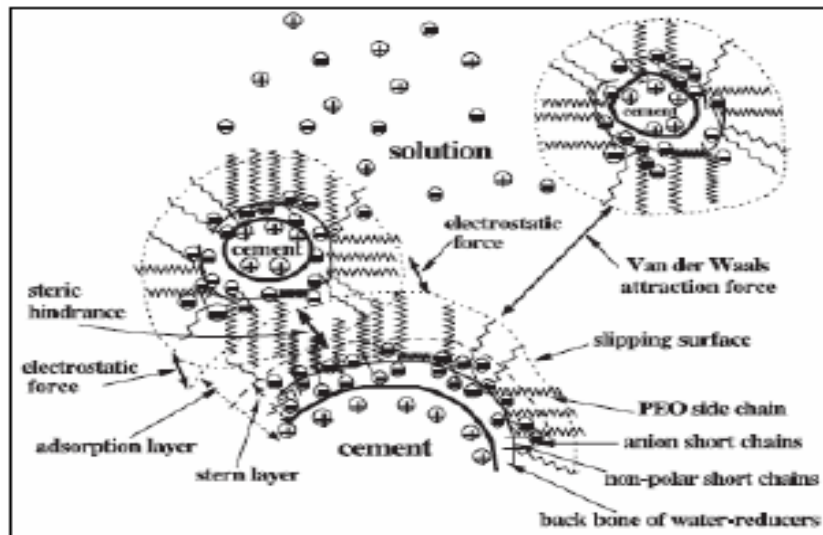


FIG7: Schéma des forces exercées entre un ensemble de particules de ciment sur lesquelles sont adsorbés des copolymères de polycarboxylates avec des chaînes PEO

5.5.3. Modes d'action des superplastifiants :

Le pouvoir fluidifiant des superplastifiants s'exerce par une combinaison de phénomènes physiques se produisant instantanément (à $t = 0$) [27,28]. Ces processus sont l'adsorption des superplastifiants, la répulsion électrostatique et l'encombrement stérique.

La dispersion des particules de ciment par les superplastifiants conduit à une évolution des propriétés rhéologiques des pâtes et mortiers de ciment

1. Adsorption des superplastifiants sur les grains de ciment

L'étude de l'effet dispersant des superplastifiants, menée par Flatt et al. [29] sur des suspensions modèles, a montré que seuls les superplastifiants adsorbés contribuaient à la dispersion. Les molécules de superplastifiant doivent d'abord s'adsorber à la surface des grains de ciment et, seulement après, elles peuvent exercer leur pouvoir fluidifiant. Une pâte de ciment peut être envisagée comme une dispersion de particules colloïdales

dans l'eau. La surface des grains de ciment porte des charges électriques, lesquelles ont pour origine des imperfections de la structure cristalline, des liaisons dissociées ou des ions adsorbés(30-31) . Cette charge confère à la particule un potentiel de surface, appelé potentiel de Nernst et noté Ψ_0 . Les électrolytes, présents dans la phase aqueuse, vont alors former une couche autour de la particule afin de neutraliser ce potentiel électrostatique [32-33]et stabiliser ainsi la dispersion. Cette couche est appelée la double couche électrochimique.

La structure de la double couche électrochimique est décrite ci-dessous d'après le modèle de Stern pour une particule portant une charge de surface positive. Elle est représentée de façon schématique à la figure 8

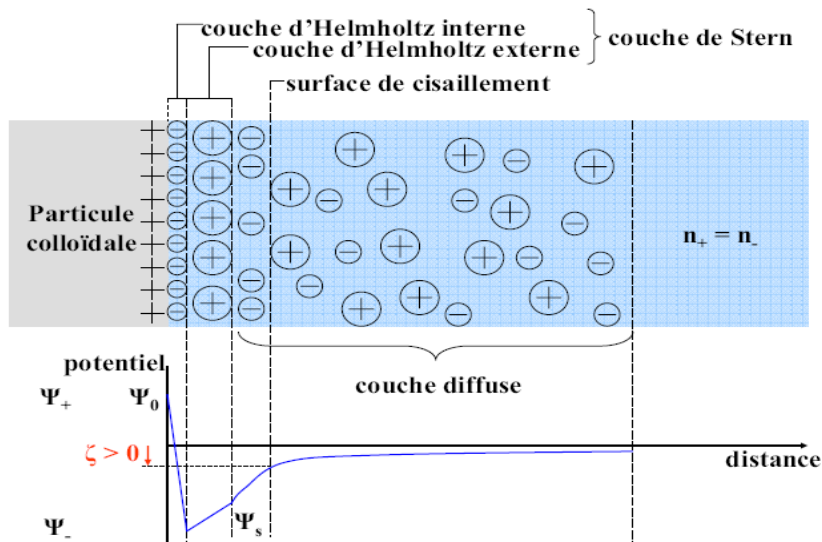


Figure 8: Double couche électrochimique d'une particule colloïdale positivement chargée et évolution du potentiel électrostatique

La particule est entourée par une couche fixe de molécules d'eau et d'ions adsorbés sous l'effet de l'attraction électrostatique. Cette couche est appelée couche de Stern, elle se divise en deux couches distinctes : les couches d'Helmholtz interne et externe. La couche d'Helmholtz interne est formée d'anions non solvatés. La couche d'Helmholtz externe est constituée par une monocouche de cations solvatés. En raison de leur taille relativement importante, les ions ne peuvent pas neutraliser complètement la charge de la particule colloïdale. La compensation est réalisée au sein de la couche diffuse [34-35]. Dans cette couche, les ions sont mobiles et leurs concentrations évoluent avec la distance, de telle façon qu'à la fin de la couche diffuse, l'électroneutralité est atteinte.

Expérimentalement, la mesure directe du potentiel de surface des particules colloïdales est impossible. Par contre, il est possible de mesurer la différence existante entre le potentiel à la surface de cisaillement dans la couche diffuse et le potentiel de la solution. Cette différence de potentiel est appelée le potentiel ζ [36].

L'adsorption des superplastifiants est influencée par les caractéristiques physicochimiques du ciment. Il a été rapporté que l'adsorption des polymères est meilleure lorsque la finesse du ciment est élevée [38]. Par ailleurs, les différentes phases cimentaires n'adsorbent pas les mêmes quantités de superplastifiant. Cela a pour origine les différents potentiels ζ de

ces composés. D'après Yoshioka et al. [39], les phases silicates, C3S et C2S, ont un potentiel ζ négatif de l'ordre de -5 à -10 mV. Par contre, les phases aluminates, C3A et C4AF, ont un potentiel ζ situé entre 5 et 10 mV. Les superplastifiants négativement chargés ont donc une plus grande affinité pour les phases aluminates.

En ce qui concerne le superplastifiant, les différents paramètres de sa structure chimique, groupement anionique, densité de charge et longueur des chaînes carbonées, ont des répercussions sur le processus d'adsorption ; elles sont décrites ci-dessous.

Le groupement anionique :

L'ancrage des polymères sur les grains de ciment a lieu par l'intermédiaire des groupements anioniques. Hirsch (40) rapporte, à ce sujet, que les groupements carboxylate s'adsorbent plus fortement que les groupements sulfonate.

La densité de charges :

Plus le nombre de groupement chargé par molécule est important, meilleure est l'adsorption(41).

La longueur des chaînes carbonées :

D'après Blask (42), les polycarboxylates ayant une longue chaîne principale et de courtes chaînes secondaires présentent l'adsorption la plus importante. D'une part, le nombre de groupes —COO— augmente avec l'allongement de la chaîne principale et, d'autre part, l'encombrement stérique généré par les longues chaînes secondaires peut gêner l'adsorption.

La répulsion électrostatique

La dispersion engendrée par les superplastifiants de type polysulfonate est majoritairement due à la répulsion électrostatique [43-28-44]. Les superplastifiants s'adsorbent à la surface des particules de ciment par des interactions coulombiennes, des forces de Van der Waals ou des liaisons hydrogènes [40]. En se fixant sur les grains de ciment, les polymères anioniques changent la charge des particules de ciment, comme le montre la figure 9

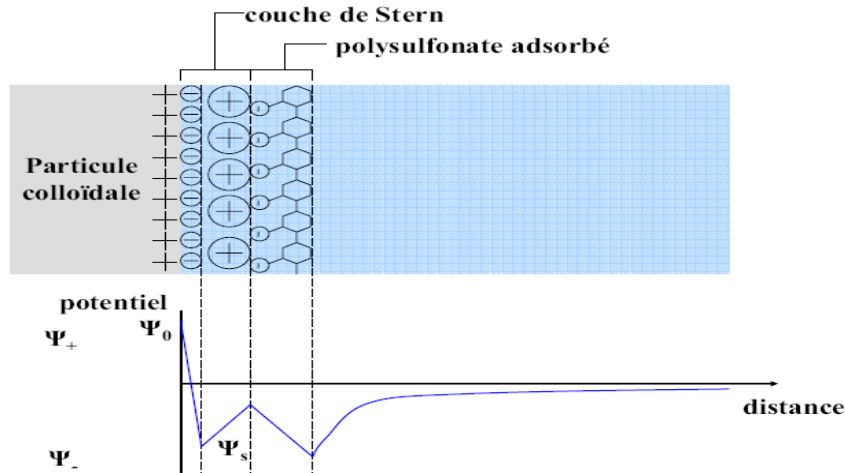


Figure 9 : Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polysulfonate

Entre chaque grain de ciment occupé par les polymères, une force répulsive se forme en raison des charges identiques. Cette force provoque une forte dispersion des particules et empêche ainsi la coagulation [45]. La dispersion des grains de ciment est représentée schématiquement figure 10.

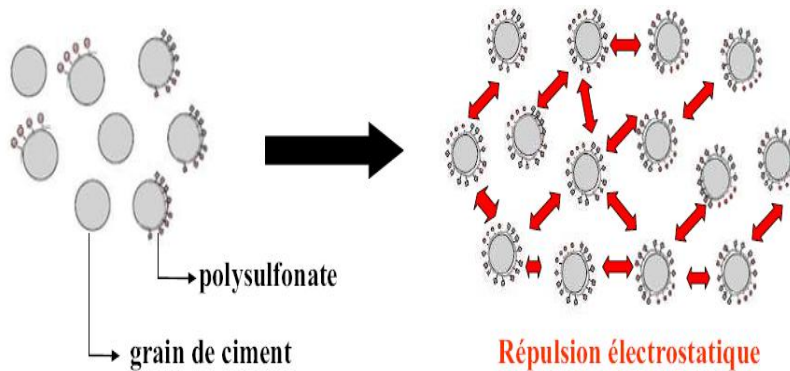


Figure 10 : Dispersion des grains de ciment par la répulsion électrostatique.

Le potentiel ζ représente une valeur approchée de la force électrostatique et permet ainsi d'étudier la stabilité d'une suspension de ciment. Il a ainsi été avancé que l'intensité de la force répulsive est intimement liée à la structure moléculaire de l'adjuvant. Uchikawa et al. (41) ont montré de cette façon que plus le nombre de groupements anioniques est élevé, plus le potentiel ζ est important et donc plus la répulsion est forte.

L'encombrement stérique

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylates [41]. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours. Lors du rapprochement de deux grains de

ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre [40]. L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères [46].

L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches [42]. La figure 11 donne une représentation schématique de cette interaction dans une suspension de ciment

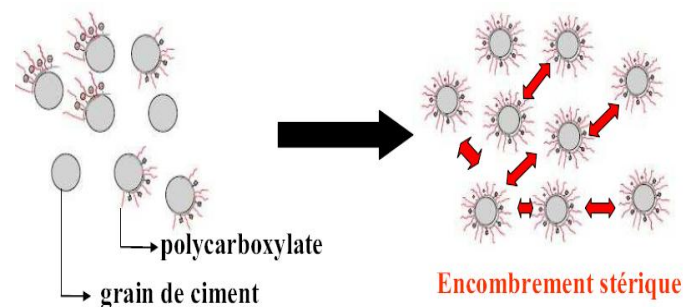


Figure 11 : Dispersion des grains de ciment par l'encombrement stérique.

Yamada et al [47] ont fourni les premières indications expérimentales de l'effet stérique des polycarboxylates. Ils ont mené une étude comparative des potentiels ζ de pâtes de ciment contenant différents types de superplastifiant. Il est ainsi apparu qu'en présence de polysulfonates, le potentiel ζ est négatif, alors qu'avec des polycarboxylates, le potentiel ζ est nul voire positif. Ces différences ont été expliquées par Plank et al [48] à partir de la structure de la double couche électrochimique lors de l'adsorption de polycarboxylates. Une représentation est proposée à la figure 12

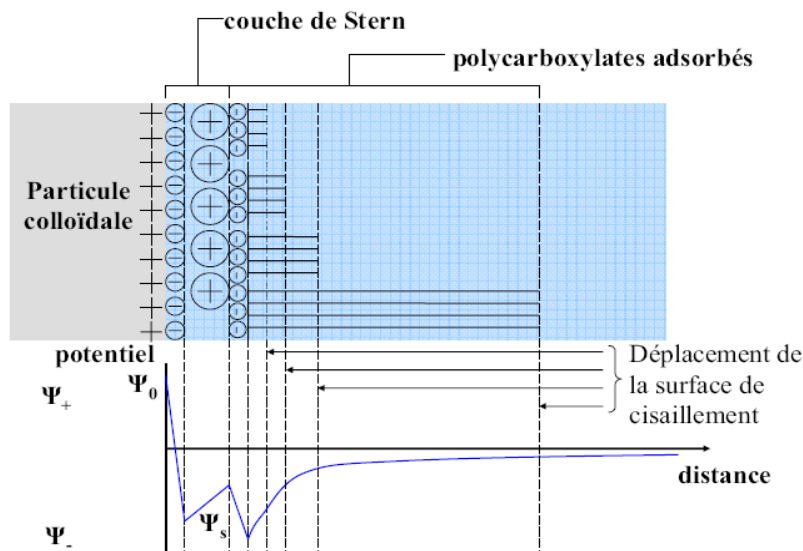


Figure 12 : Évolution du potentiel lors de l'adsorption de superplastifiants de type polycarboxylate (d'après Plank et al 48).

L'adsorption des superplastifiants de type polycarboxylate provoque un élargissement de la couche de diffusion et/ou un déplacement de la surface de cisaillement. Pour de courtes chaînes secondaires, la répulsion engendrée est, dans ces conditions, semblable à celle créée par les polysulfonates. Lorsque les chaînes secondaires s'allongent, le potentiel ζ devient nul puis positif (48-49). Le potentiel ζ fournit ainsi une évaluation approximative des proportions électrostatique et stérique dans la dispersion des polycarboxylates [48]. Elles dépendent, par conséquent, de la longueur des chaînes secondaires et de la densité de charges anioniques de la chaîne principale [48-49]

. Effets rhéologiques :

En l'absence de superplastifiant, les particules de ciment s'agglomèrent en raison des charges opposées présentes à leur surface. Ce phénomène va se traduire par un seuil d'écoulement [50] au niveau des propriétés rhéologiques. En présence de superplastifiant, les polymères organiques vont limiter l'agglomération des grains, ce qui aura pour conséquence une diminution voire une suppression du seuil d'écoulement. De plus, lors de la dispersion des particules, la structure floculée va se dissoudre et l'eau retenue à l'intérieur va être libérée, de telle façon qu'elle pourra à nouveau contribuer à l'écoulement. La figure 13 reprend les effets des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques d'une pâte de ciment.

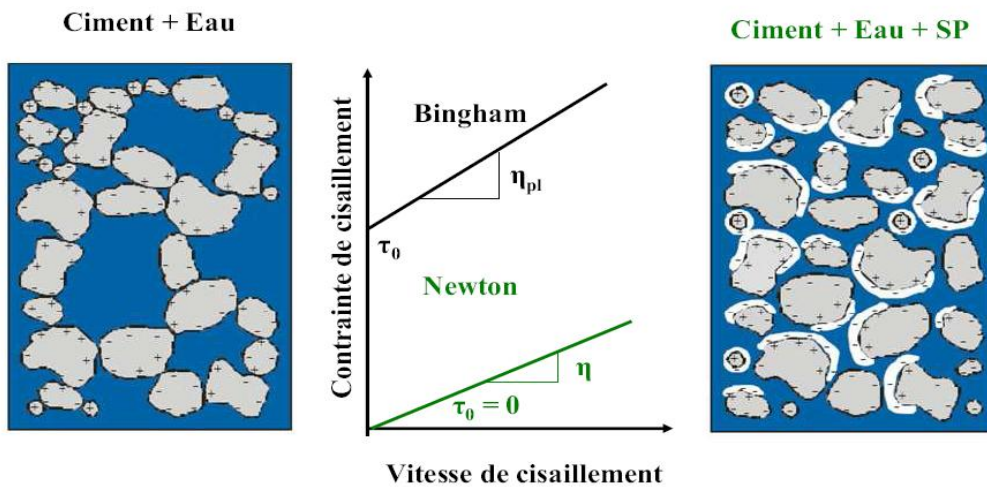


Figure 13: Effet des superplastifiants sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment(50).

5.5.4. La compatibilité ciment adjuvants dispersants :

La perte d'affaissement, le retard de prise, le raidissement ou la perturbation de la teneur en air entraîné sont tous synonymes d'incompatibilité ciment/adjuvant.

Tous les cas d'incompatibilité ciment/adjuvants dispersants présentés dans la documentation montrent clairement l'importance des interactions du sulfate de calcium avec l'adjuvant dispersant. Les travaux de Locher et coll. Expliquent l'importance du rapport C/A/ions sulfate sur le comportement rhéologique du béton non adjuvanté Par contre, la présence d'adjuvant peut modifier l'équilibre entre les interactions aluminate/sulfate et ainsi affecter la maniabilité et le temps de prise du béton. [67]

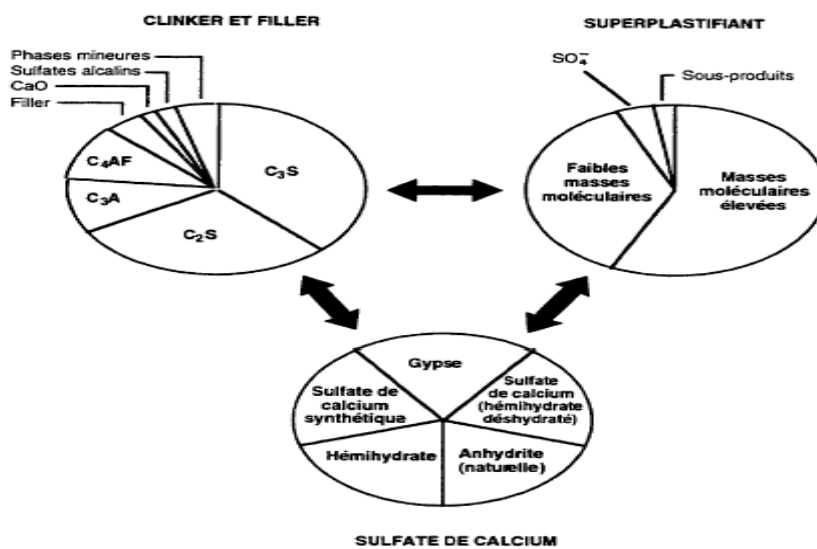


Fig. N°14: Compatibilité ciment/superplastifiant/sulfate de calcium

5.5.5. Influence sur l'hydratation des ciments

De nombreux auteurs ont étudié l'influence de différents superplastifiants sur l'hydratation des phases pures de ciment. Ils ont montré que les PNS et PMS retardent l'hydratation de la phase de C3A(58). D'autres auteurs ont également montré que ces polymères retardent l'hydratation des phases silicates, bien que leurs effets soient plus modérés que ceux induits sur les phases aluminates[58]. .

5.6. L'agent colloïdal ou de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage.

L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. [68]

6. MODES DE FORMULATIONS DES BAP:

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. [69]

Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels [70] :

- absence de vibration qui réduit les nuisances sonores,
- bétonnage de zones fortement ferraillées et à géométrie complexe,
- pénibilité du travail moindre,
- réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants),
- modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

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

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- la première [71-72] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante ($450 \text{ à } 600 \text{ kg/m}^3$) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [73]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables

6.1. Cahier des charges minimum a l'état frais:

Plusieurs spécificités de composition des BAP découlent de ces diverses approches.

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est à dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement importants.
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement (figure 15). Ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée. [69]

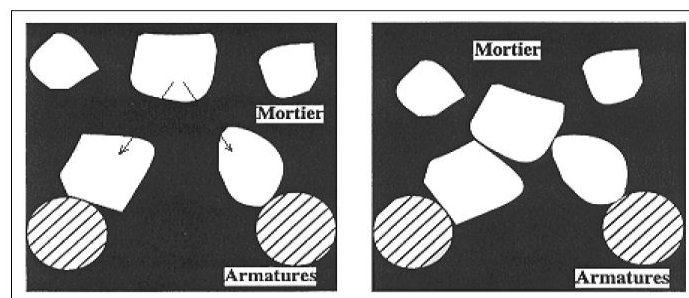


Figure 15 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle (74)

- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques.
- de plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort pour assurer une bonne d'adhérence des armatures, et limiter les la fissuration [75]

-En résumé, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés a priori contradictoires comme la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

6.2. Particularités De La Composition Des BAB :

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre. [69]

➤ Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³)

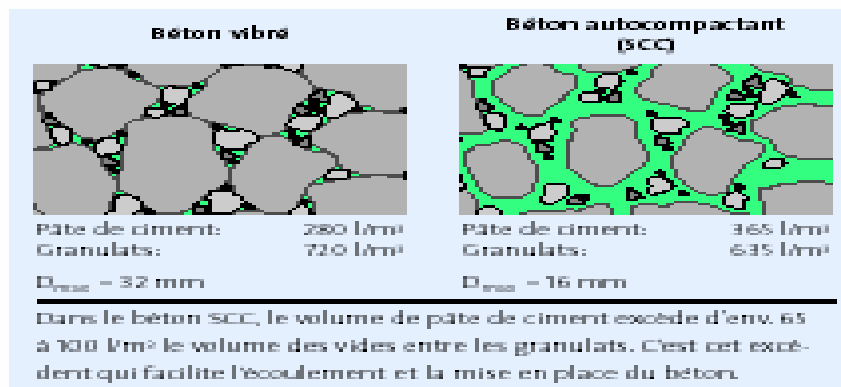


Figure16 : volume de pâte relatif au BAP est différent de BV

➤ Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût de formule trop élevé). Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçants du béton (figure 17)

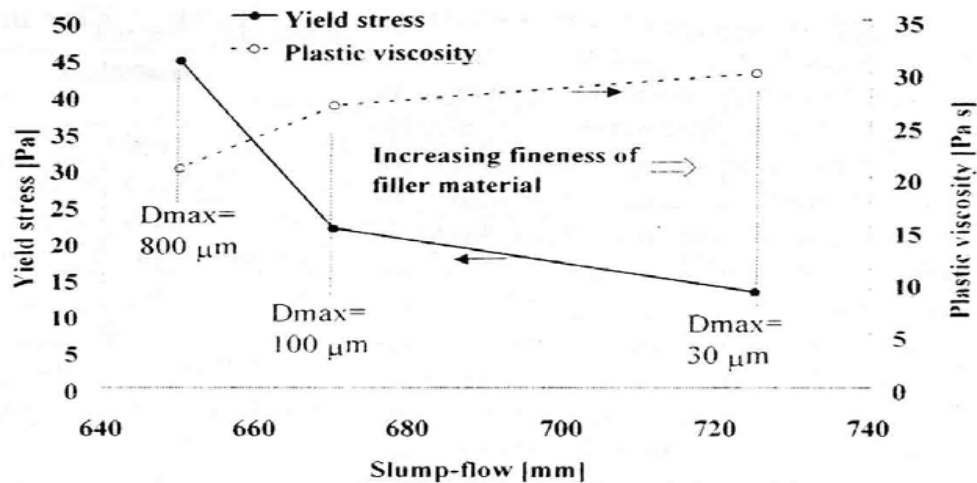


Figure 17 : Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton (7)

➤ L'emploi de superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylates, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante.

➤ L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure 18). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

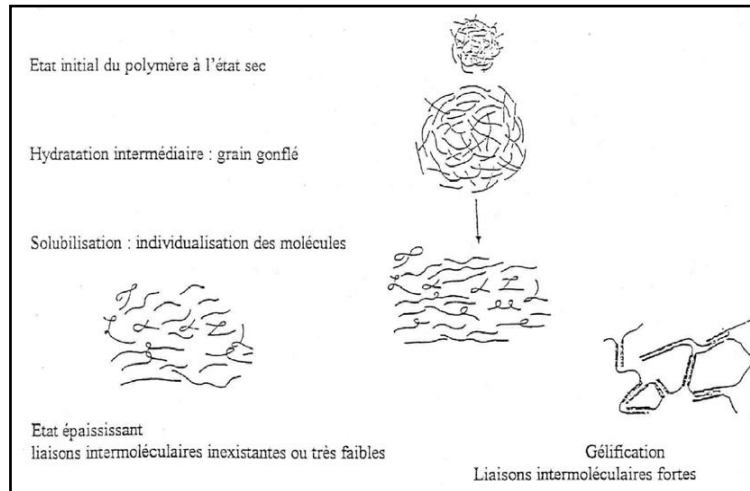


Figure 18: Interaction entre l'eau et les polysaccharides [79]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure 19).

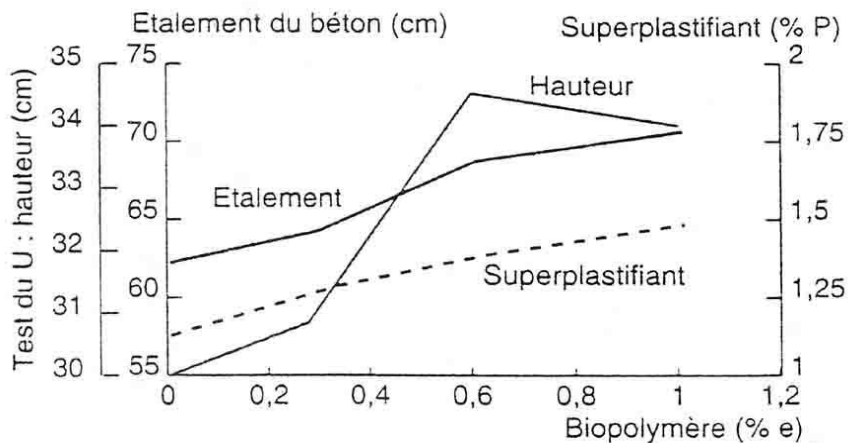


Figure 19: Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [74]

➤ **Un faible volume de gravillon**

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone

confinée. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{MAX}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec D_{MAX} , cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

[74]

6.3. Quelques points à surveiller...

Toute la gamme de résistances des bétons conventionnels peut être obtenue avec les BAP en jouant sur la nature du liant qui les compose (ciment, additions) et le rapport eau sur liant.

Les résistances au jeune âge peuvent être affectées lorsque les bétons contiennent de grosses proportions d'additions, ou un fort dosage en adjuvant.

Il est possible de produire et de stabiliser suffisamment d'air dans ces bétons avec un agent entraîneur d'air classique, pour les protéger efficacement du gel-dégel. Il semble toutefois indispensable d'introduire l'agent entraîneur d'air, avant la fluidification complète du béton (avant l'ajout de la totalité du superplastifiant, par exemple). En effet, l'entraînement et la stabilisation de l'air semblent plus difficiles, voire impossibles, lorsque le béton est très fluide dans le malaxeur.

7. Pratique actuelle de la formulation des BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des

fabricants de béton près emploi, est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer). En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail au formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle

Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

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

Il est à noter enfin que les précurseurs et les acteurs de la formulation - sur le terrain - sont les fournisseurs en adjuvants, ce qui est tout à fait cohérent avec le rôle fondamental du superplastifiant dans le concept du BAP.

8. Les Approches de formulation des BAP :

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes [76]:

8.1. L'approche Basée sur l'optimisation des Mortiers

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

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi *et al* proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage

Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs *et al* montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier. [3]

8.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte : Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulates, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant.

La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage [77]

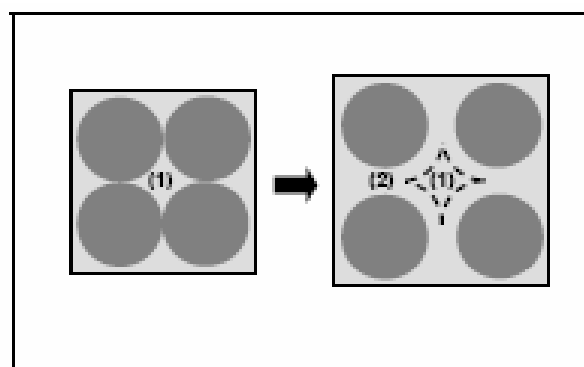


Fig. 20 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulates.

[Oh et al 99] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

8.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [7]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. Considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide.

A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

[Sedran et de Larrard 99] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton. [77]

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. [Roshavelov 99] a également développé un modèle d'empilement granulaire, qui semble néanmoins être resté à un stade plus théorique.

8.4. Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat *et al* ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus,

notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFG [77]

8.5.Principe et application des approches :

1. Approche japonaise :

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

Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique.

Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'oeuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

➤ Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité.

Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (**Fig. N°21**). Elle dépend bien sûr du mode de compactage. A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCP. La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³.

Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

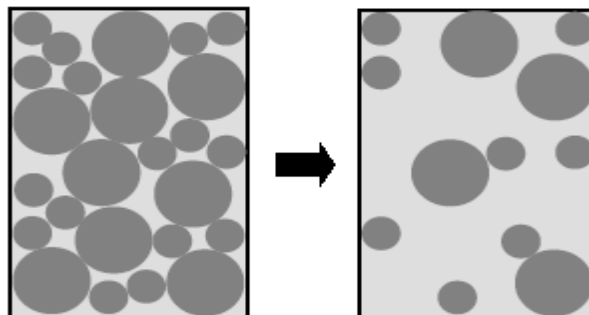


Fig. N°21 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité

➤ **Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton.

La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

➤ **Dosage du liant :**

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

➤ **Dosage de l'eau et du superplastifiant :**

Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [77]

Les auteurs définissent l'étalement relatif D par l'équation ci – dessus :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2} \quad (01)$$

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

$$T = \frac{10}{t_e} \quad (02)$$

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

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

Lors des essais sur mortiers, nous avons préféré fixer le rapport massique filler sur ciment à 0,8, et non pas poser la masse de ciment à 350 kg/m³, ce qui aurait conduit à un volume de filler supérieur à celui du ciment (il existe à l'heure actuelle peu de données dans la littérature sur de telles proportions de filler). Les essais ont été réalisés à l'aide d'un entonnoir et d'un cône à mortier, dont les dimensions sont la moitié de celles d'un cône d'Abrams.

La Fig.N°22 présente le résultat de la recherche du couple « eau / superplastifiant ». L'étalement normalisé D optimal est égal à 10 et le temps d'écoulement relatif T optimal est égal à 1.

Selon les auteurs, ce couple est optimal dans le sens où il donne un béton fluide avec un risque de ségrégation minimale.

Le dosage en superplastifiant trouvé est de 1 % de la masse de fines, le rapport E/(C+A) de 0,23 et la masse de ciment de 400 kg/m³.

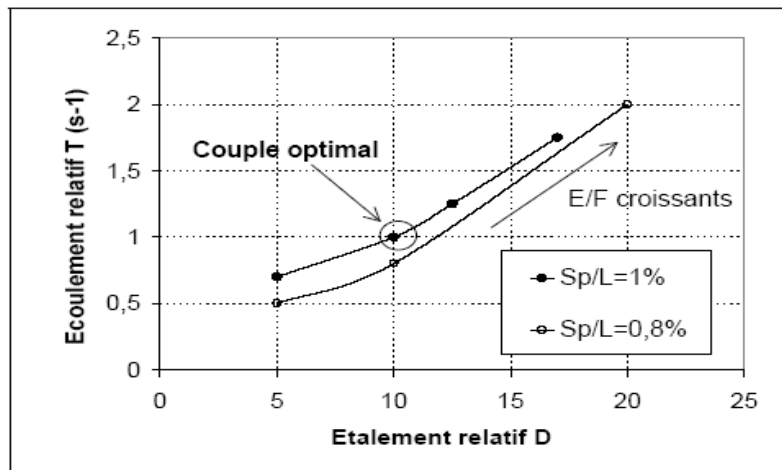


Fig. N°22 : Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D. La flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines (E/F) croissants.

Le couple optimal est indiqué par un cercle

2. Approche Suédoise: proposée par [Pettersson et al, 1996]:

La méthode suédoise repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène.

La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables. [7]

3. Approche Française :

Méthode française (LCPC) : proposée :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide . Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

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

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante [7] :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (Effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10⁴ La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/ phase liante sont optimisées.

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

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

4.Méthode LGC :

La formulation de BAP est beaucoup plus complexe que celle de béton ordinaire. Pour l'instant, il n'existe pas de méthode générale de formulation pour le BAP. Cependant, plusieurs méthodes de formulation ont été développées dans des pays différents. Okamura et Ouchi ont premièrement proposé une méthode empirique de formulation du BAP au Japon. La méthode développée par O. Petersson et al. vise à trouver la teneur maximale de granulats sans provoquer de blocage autour des armatures. Bui et al. ont amélioré cette méthode en ajoutant un critère de phase liquide. Dans la méthode proposée par N. Su et al, un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster

la teneur relative de granulats et de pâte. Sedran et de Larrard ont développé un modèle mathématique, appelé modèle d'empilement compressible, permettant de prévoir les comportements du BAP à l'état frais, en fonction des propriétés du squelette granulaire. Récemment, basé sur le travail d'A.W. Saak et al, L. Ferrara et al. ont établi une zone autoplaçante pour la formulation du BAP fibré. Une nouvelle méthode de formulation de BAP a été proposée dans ce mémoire tout en nous servant des méthodes existantes. Elle a l'avantage d'être simple à utiliser. En effet, seulement deux types d'essais, à savoir essai de compactage pour le granulats et essai d'étalement pour la pâte, sont nécessaires. La première particularité de la méthode est la prise en compte directe de l'influence de superplastifiant sur le comportement de la pâte à l'état frais. Ceci a été réalisé à l'aide d'un plan d'expérience

permettant de relier la pâte de ciment (ou la pâte de filler), le superplastifiant et l'étalement de la pâte grâce à un petit nombre d'essais. La deuxième particularité est le développement d'un nouveau processus de calcul de mélange de la pâte et des granulats basé sur la théorie d'excès de pâte. La dernière particularité de cette méthode est qu'elle permet de confectionner aussi bien des bétons ordinaires que ceux à hautes performances pour une valeur de résistance préalablement fixée. [80]

4-1. Méthode de formulation

L'idée principale de cette méthode consiste à déterminer le compactage maximal du granulat en mesurant sa masse volumique avec différents rapports du sable sur le granulat puis à calculer la quantité de liants (ciment et addition minérale) en se basant sur la résistance à la compression du BAP souhaitée. En outre, les pâtes formant le liant (ciment et addition minérale) du mélange doit avoir la même fluidité. Par ailleurs, le dosage du superplastifiant du BAP est déterminé en fixant une valeur cible d'étalement par le biais de mortier avec l'essai d'étalement au cône [80]. Les essais de vérification à l'état frais tels que l'étalement au cône d'Abrams, l'écoulement à la boîte en L, la stabilité au tamis et l'écoulement à l'entonnoir, sont effectués après le malaxage pour vérifier la formulation du BAP. Dans ce mémoire, les classes correspondant aux utilisations normales du BAP (i.e. poteau, poutre, etc.) sont choisies: la classe SF2 (diamètre d'étalement : 660-750mm), VS2/VF2 (T500>2s ou temps de passage à l'entonnoir : 9-25s), PA2 (ratio de remplissage>0,80 avec 3 barres d'acier) et SR2 (taux de ségrégation<15%) .

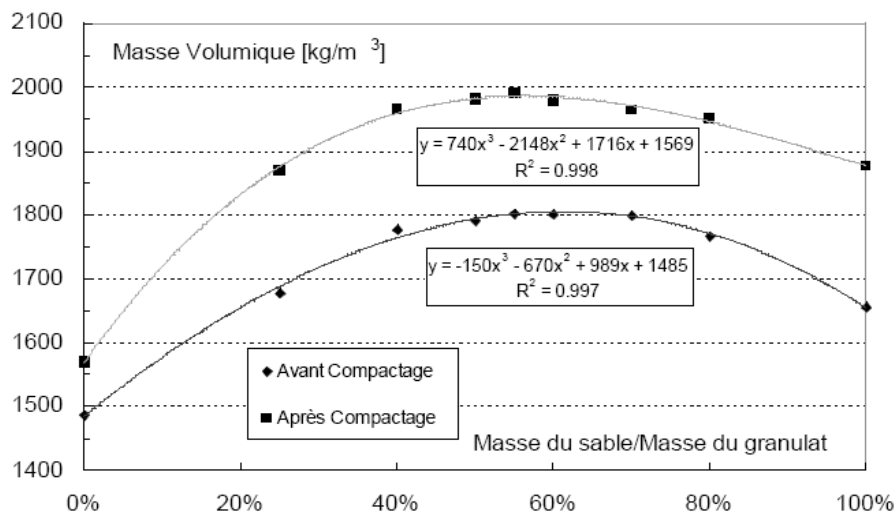


Figure23 : Essai de compactage selon ASTM C29/C29M.

a. Granulat

- . *Essai de compactage*

Le granulat devient plus compact dans le processus de mélange, car l'effet lubrifiant de la pâte diminue le frottement entre les grains et facilite le tassement de granulat. La norme ASTM C29/C29M permet de simuler ce processus de tassement par la mesure de la masse volumique de granulat avant et après compactage. Le rapport de sable sur granulat est varié de 0 à 100 %. Les mesures effectuées permettent d'obtenir, par régression, des courbes représentant le mieux les données expérimentales,

comme le montre la figure 23. Sur la courbe avant compactage se trouvent deux points particuliers : $R_{sable / granulat} = 0 \%$ correspondant à la masse volumique apparente de gravillon $\rho_{gravillon}$ et $=100\%$ correspondant à celle de sable ρ_{sable} . Le rapport optimal du sable sur le granulat $R_{sable / granulat}$ se trouve au sommet de la courbe après compactage. Le packing facteur PF, défini comme étant le rapport de la masse volumique du granulat après et avant compactage, est obtenu au point correspondant au rapport optimal $R_{sable / granulat}$:

$$PF = \frac{\rho_{apres}}{\rho_{avant}} \quad (3)$$

Notons qu'en connaissant la quantité de granulat par unité de volume avant le mélange avec la pâte, la quantité finale de granulat sera facilement déduite en la multipliant avec le PF.

- . *Quantité de granulat*

Le volume du sable et du gravillon avant compactage sont désignés respectivement par V_{sable} et $V_{gravillon}$. Ainsi, leurs masses correspondantes sont

$m_{sable} = \rho_{sable} V_{sable}$ et $m_{gravillon} = \rho_{gravillon} V_{gravillon}$. Afin de déterminer V_{sable} et $V_{gravillon}$, deux conditions peuvent être établies :

$$\frac{\rho_{sable} V_{sable}}{\rho_{gravillon} V_{gravillon} + \rho_{sable} V_{sable}} = R_{sable / granulat} \quad (4)$$

$$V_{sable} + V_{gravillon} = 1 \quad (5)$$

La masse finale de granulat dans un volume unitaire est obtenue en utilisant la définition de PF:

$$M_{granulat} = PF(m_{sable} + m_{gravillon}) = PF(\rho_{sable} V_{sable} + \rho_{gravillon} V_{gravillon}) \quad (6)$$

b. Pâte

Deux types de ciment CEM I 52,5R et CEM II 32,5 R ont été employés pour

confectionner le BAP avec les résistances à la compression différentes. Le premier permet d'obtenir le BAP à haute performance ($f_{c28} \geq 50\text{MPa}$) tandis que le second conduit à des bétons de résistance moyenne ($30\text{MPa} < f_{c28} < 50\text{MPa}$). Notons que le filler calcaire a été utilisé en tant qu'addition minérale dans les deux cas. La formulation du BAP avec CEM I 52,5R est présentée dans la suite et la confection du BAP avec CEM II 32,5R peut se réaliser suivant le même processus en remplaçant le rapport de E/L par E/C.

- *. Quantité de liant*

La résistance à la compression du BAP peut être calculée par la formule de Bolomey

$$f_{c28} = Gf_{\text{ciment}} \left(\frac{L}{E} - 0,5 \right) \quad (7)$$

L est le liant équivalent et se compose de ciment C et d'une partie d'additions minérales A, soit $L=C+kA$.

La fourchette du rapport $\frac{F}{(C+F)}$ est de [20%, 25%], d'où :

$$F = mC, m \in [0,25; 0,33] \quad (8)$$

Le volume de pâte $V_{\text{pâte}}$ peut être exprimé comme suit:

$$V_{\text{pâte}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{filler}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{air}} \quad (9)$$

Finalement, la quantité de ciment (C), filler (F) et eau (E) sont obtenues :

$$C = \frac{V_{\text{pâte}} - V_{\text{air}}}{\left(\frac{1}{d_{\text{ciment}}} + \frac{m}{d_{\text{filler}}} + \frac{1+km}{d_{\text{eau}} \left(\frac{f_{c28}}{Gf_{\text{ciment}}} + 0,5 \right)} \right)} \quad (10)$$

$$F = \frac{\left(\frac{f_c}{Gf_{\text{ciment}}} + 0,5 \right) \left(V_{\text{pâte}} - V_{\text{air}} - \frac{C}{d_{\text{ciment}}} \right) - \frac{C}{d_{\text{eau}}}}{\frac{k}{d_{\text{eau}}} + \frac{1}{d_{\text{filler}}} \left(\frac{f_{c28}}{Gf_{\text{ciment}}} + 0,5 \right)} \quad (11)$$

$$E = d_{\text{eau}} (V_{\text{pâte}} - V_{\text{air}} - V_{\text{ciment}} - V_{\text{filler}}) \quad (12)$$

- *. Fluidité de pâte avec prise en compte de l'effet de superplastifiant*

La composition de la pâte est complètement déterminée en fixant la valeur de la résistance à la compression du BAP. Cependant, il faut vérifier que la pâte de ciment et la pâte de filler présentent la même fluidité en faisant des essais d'étalement au cône. Ainsi, le dosage du

superplastifiant peut être simplement ajusté pour que les comportements du BAP à l'état frais soient conformes aux exigences. Comme le rapport d'E/L pour le BAP à haute performance ($f_{c28} > 50\text{MPa}$) est habituellement inférieur à 0,5, la fluidité de la pâte sera trop petite pour être mesurable sans addition de superplastifiant. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'influence de superplastifiant dans les essais d'étalement pour les pâtes.

L'égalité de fluidité des pâtes est établie avec la condition que l'étalement des pâtes soit identique pour un même dosage de superplastifiant (en % de masse de liants). Pour ce faire, toute la quantité d'eau E peut être divisée en deux parts : une part est l'eau exigée par le ciment E_c et l'autre est l'eau exigée par le filler calcaire E_f . Les rapports E_c/C et E_f/F pourraient être déterminés à l'aide des abaques (figure 24) afin de calculer la quantité de E_c et E_f . Les abaques décrivant la relation entre l'étalement de la pâte, le rapport E_c/C ou E_f/F et le dosage du superplastifiant sont établies par la méthode du plan d'expérience dans laquelle un modèle polynomial du 2ème degré est utilisé et la distribution des points expérimentaux suit le plan de Doehlert.

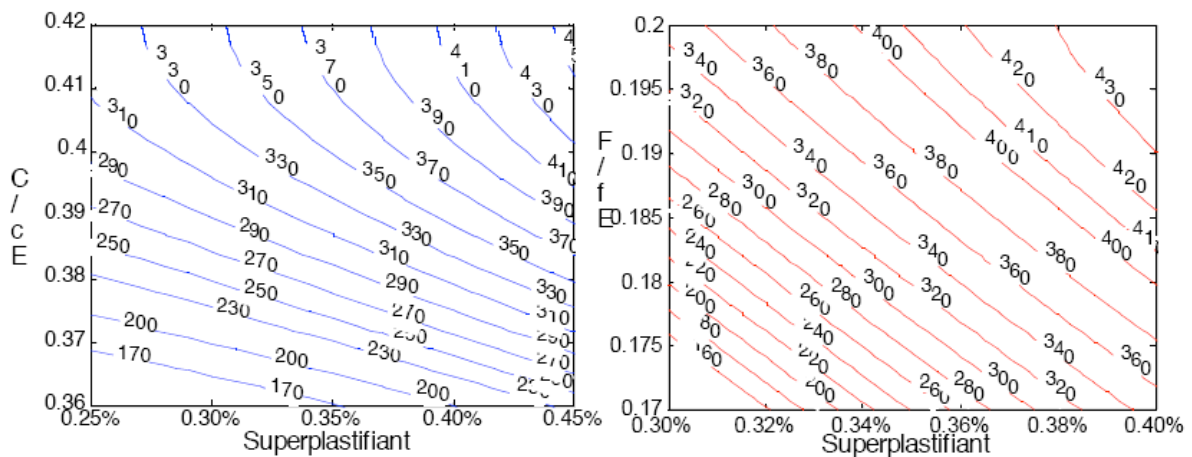


Figure 24 : *Abaques pour la détermination du rapport E_c/C et E_f/F .*

4.2. Dosage de superplastifiant :

Les abaques établis ne permettent pas de connaître et de fixer définitivement le dosage de superplastifiant pour le BAP. Ce dosage est estimé grâce à l'essai d'étalement sur le mortier effectué avec le même cône que celui utilisé pour la pâte. On considère que le dosage de superplastifiant est convenable quand l'étalement du mortier tombe sur une valeur ou dans une fourchette de valeur ciblée. Une fois déterminée, la valeur ciblée peut être utilisée pour tous les BAP utilisant les mêmes matériaux. Ainsi, les essais effectués dans notre laboratoire,

en tenant en compte des données de la littérature, ont conduit à trouver des valeurs ciblées suivantes : un étalement de 34 cm pour le mortier avec CEM I 52,5 R et de 36 cm pour le mortier avec CEM II 32,5 R.

9. LES PROPRIETES PRINCIPALES D'UN BAP A L'ETAT FRAIS

Les bétons autoplaçants se comportent comme des fluides plus ou moins visqueux et se mettent en place sans sollicitation.

Sur chantier, le test d'affaissement au cône d'Abrams est très utile pour caractériser les bétons ordinaires, alors qu'il n'est utilisé que pour mesurer l'étalement de la galette d'un BAP et le temps de passage à une galette intermédiaire de 50 cm de diamètre. Or, un seul test ne suffisant pas à prédire la qualité d'un béton autoplaçant, plusieurs tests ont été développés pour caractériser les propriétés du BAP [77]. Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage [4]

9.1. Le remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externe ou interne). Le remplissage est observé sous deux aspects (75): la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects, puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton [27].

9.2. La résistance à la ségrégation :

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions. La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons différentes, comme la séparation entre la pâte et les

granulats, la séparation entre le gravier et le mortier qui peut conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

La résistance à la ségrégation du béton peut aussi être augmentée en élevant la viscosité de l'eau dans la suspension, avec certains agents de viscosité [27].

9.3. Caractéristiques Rhéologiques Fondamentales Des BAP :

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

La rhéologie donne les relations entre contraintes et déformations d'un élément de volume, en tenant éventuellement compte de leur histoire et des valeurs actuelles de leur dérivée par rapport au temps [69]. Ces relations, dites de comportement, font correspondre les déformations d'un élément de volume aux contraintes qui lui sont imposées.

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

Le fluide est considéré comme *binghamien* si la courbe d'écoulement est une droite, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \gamma$$

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

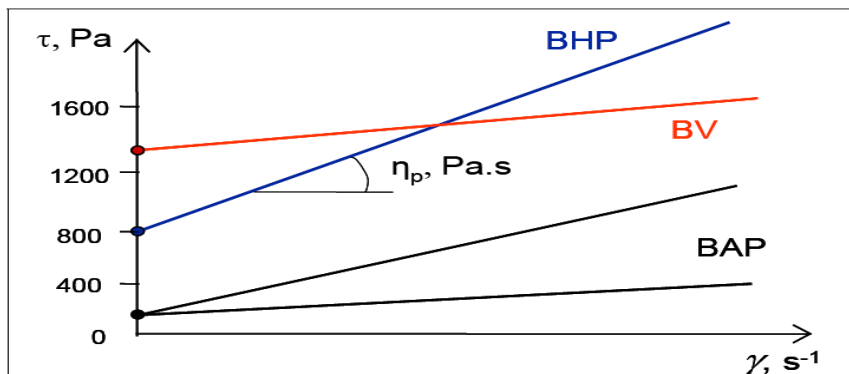


Figure 25 : Exemples de comportements rhéologiques pour différents types de bétons

En ce qui concerne les bétons autoplaçants, des auteurs [De Larrard 96] ont montré que leur équation de comportement suit le modèle de *Herschel-Bulkley* dont l'équation de comportement est la suivante :

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \tag{13}$$

où a et b sont des constantes de comportement.

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

Ces grandeurs (seuil de cisaillement, viscosité plastique) permettant de définir le comportement d'un béton lors de sa mise en place sont quantifiables à partir d'appareils appelés rhéomètres.

9.4. Essais de caractérisation sur bétons autoplaçants

Plusieurs essais ont été développés pour déterminer les propriétés rhéologiques tant au point de vue de la fluidité que de la ségrégation (essai à la boîte en L, au tube en U et au cône en V, essai d'étalement, divers rhéomètres, essai d'enfoncement de billes, etc.). Certains essais permettent de qualifier soit la fluidité du béton, soit son comportement rhéologique. Pour évaluer la résistance à la ségrégation statique, on est actuellement contraint de faire des mesures sur béton en cours de durcissement ou durci (sciage et comptage de granulats, ultrasons, micro-tomographie 3D, etc...) [81].

a. Etalement :

Cet essai est très simple à faire puisque qu'on utilise le même équipement que pour l'affaissement. Il permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant. Plus l'étalement est élevé, meilleure est la déformabilité [1].

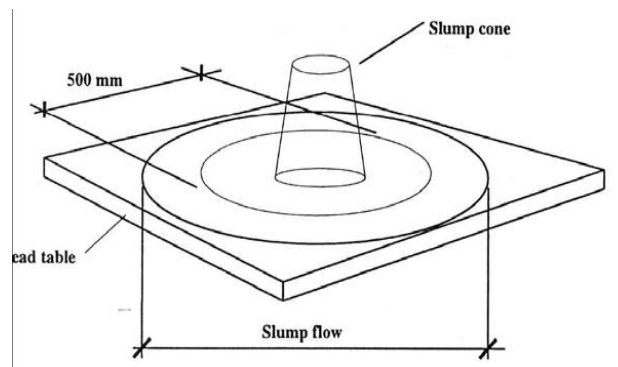


Figure 26- : Mesure de l'étalement

On vise habituellement un étalement compris entre 600 et 700 mm pour un béton autoplaçant. Il faut cependant noter que cet essai donne seulement une idée de la déformabilité et qu'il faut donc le compléter par un essai mesurant la résistance à la ségrégation ou la capacité de remplissage.

b. ESSAI DE L-BOX

Cet essai est réalisé en utilisant une boîte ayant une forme en L. elle permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables[1] Un dessin technique de la boîte est décrit par la figure 27



Figure 27: la boîte L-BOX

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2 / H_1 . Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en aval de la grille. C'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. Il est également possible d'exprimer le résultat de l'essai par la seule valeur de H_1 . Cette mesure est plus précise que le rapport H_2/H_1 mais son utilisation est moins répandue.

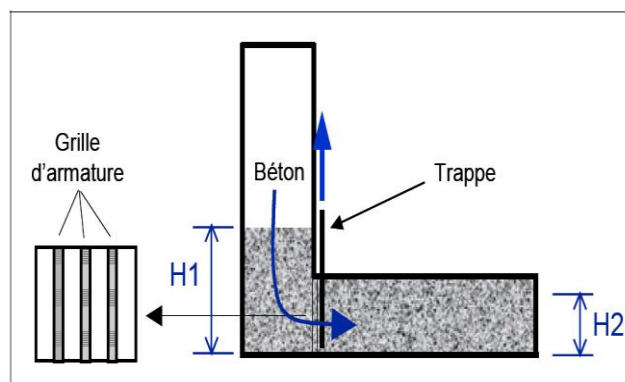


Figure 28: Mesure du taux de remplissage ($H_2/H_1 \approx 80\%$).

c. ESSAI DE STABILITE AU TAMIS(1)

C'est un essai de qualification des bétons autoplaçants face au risque de ségrégation.

Il consiste à déposer deux litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5mm d'ouverture. [1]

Après 5minutes, on pèse la quantité de mortier ayant traversé le tamis. Cette quantité par rapport à la quantité de mortier initialement présente dans le contenant de 2L donne l'indice de ségrégation. On vise un indice de 30% au plus pour un béton autoplaçant [AFGC, 2000].



Figure 29: Tamis de 5mm + fond - Mesure de la laitance.

d. Essai d'étalement modifier (essai J-ring) :

Le test au J-ring est une conception de GTM Construction. Il a pour but de considérer le comportement du béton face au blocage dans les armatures selon la déformabilité du BAP suivant un écoulement pareil à celui rencontré avec l'étalement au cône d'Abrahams. Le nombre d'armatures peut être modifié selon l'essai souhaité. Le comportement au blocage du béton est quantifié par le diamètre d'étalement s_J et le coefficient st_J qui est la différence des hauteurs moyennes du béton entre la surface du béton dans le cône formé et celle du béton qui se trouve à l'extérieur des armatures du J-ring:[1]

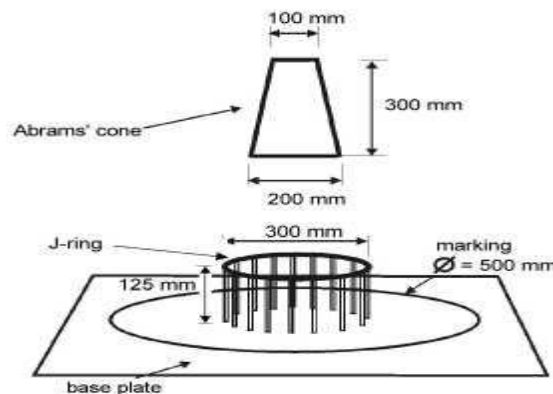


Figure 30 : Essai J-ring (par GTM Construction)

On peut également déterminer le temps d'écoulement T500 qui indique le taux de déformation pour une distance d'écoulement définie et un obstacle donné.

e. Essai de l'entonnoir (V-funnel/Orimet)

Le dispositif expérimental du test de l'entonnoir est décrit sur la Figure suivante :

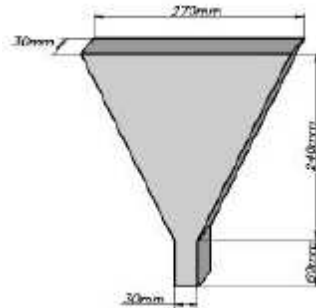


Figure 31: Test à l'entonnoir (V-funnel/ Orimet)

Le temps d'écoulement dans un V-funnel peut caractériser les trois paramètres rhéologiques d'un béton autoplaçant. Il peut alors être utilisé seul pour déterminer l'autoplaçance. Dans le cas d'un blocage causé par une grande quantité de granulats ou de la ségrégation, le V-funnel conduit à des temps d'écoulements relativement plus grand qu'avec un Orimet car l'orifice est de 80mm. C'est pourquoi un Orimet est plus approprié pour la détermination de la capacité de passage et de la ségrégation. Pour cette raison, le V-funnel est une meilleure méthode pour tester la capacité de remplissage.

f. Essai à la boîte en U :

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

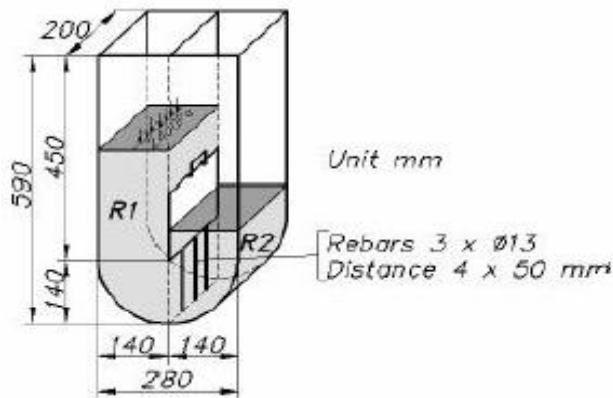


Figure 32 : Essai à la boîte en U (ou U-box).

Une boîte transparente en forme de U est séparée en son milieu par des barres d'armature (13 mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre) et d'une porte coulissante. Après avoir rempli un côté de la boîte avec du béton frais, on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa. On fait ensuite coulisser la porte pour laisser passer le béton. La hauteur qu'atteindra le béton de l'autre côté des barres d'armatures sera l'indicatif de la capacité de remplissage. [1]

10. PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI :

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés. [77]

10.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques [77].

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

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges.

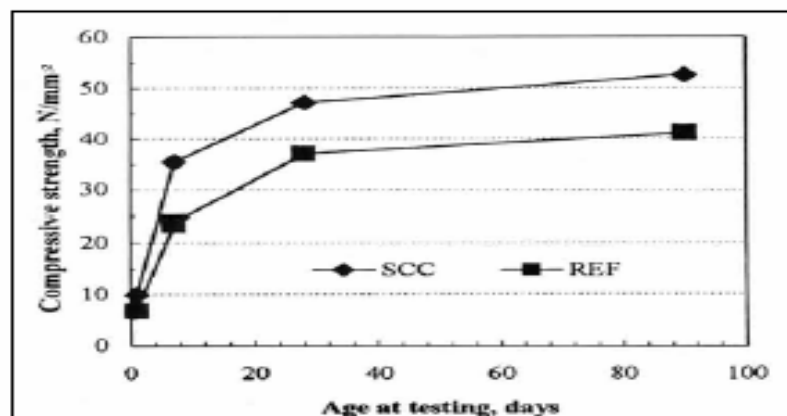


Figure 33 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF)

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [83].

10.2. Résistance à la traction :

Gibbs 99 ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, Gibbs 02 ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [77]

10.3. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré [77].

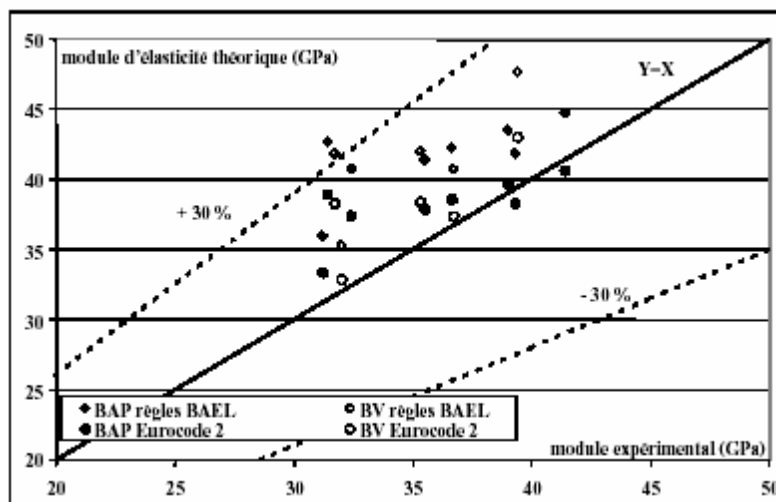


Figure 34 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [77]

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante

Jacob et Hunkeler ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est du au petit dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment.

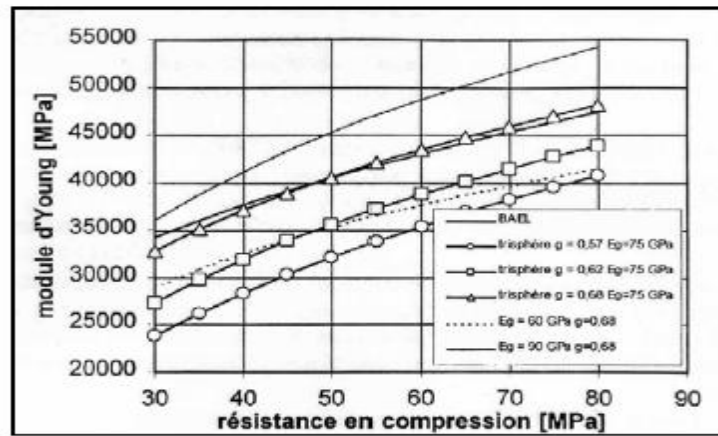


Figure 35 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [77]

10.4. Le retrait

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-200 $\mu\text{m}/\text{m}$) que celui des BV.

Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ; sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP. [77]

Ogawa et Al , constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'il contiennent est plus importante

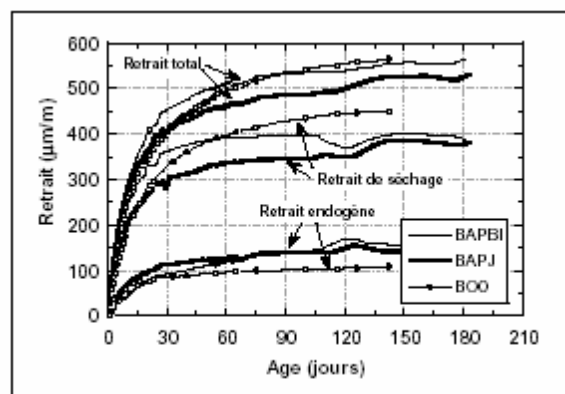


Figure 36 : Retraits des BAP B1 (E/C=0,50), BAP J(E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45) [77]

10.5 Fluage :

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une

importance considérable lors de calcul des structures de bétons.

le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, où il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. [77]

11. Mise en oeuvre du béton

11.1 Méthodes de mise en oeuvre des BAP

Les BAP présentent des contraintes de mise en oeuvre largement limitées par rapport aux bétons ordinaires vibrés. On rappelle que, dans le cas traditionnel des bétons vibrés, la mise en oeuvre doit se faire par couches d'au plus 50 cm (proportionnées à la hauteur du corps des aiguilles vibrantes), avec une hauteur de chute inférieure à 1,5 m et en évitant de déplacer le béton par effet de la vibration sur une distance de plus de 2 m. [75]

Pour les BAP, on admet des hauteurs de chute jusqu'à 5 m (le béton est beaucoup plus résistant à la ségrégation) et des déplacements horizontaux dans le coffrage de 5 à 10 m (suivant la résistance à la ségrégation du BAP et la densité de ferrailage).

Ceci permet une **mise en oeuvre beaucoup plus rapide**, toutefois généralement limitée par la vitesse maximale de montée dans le coffrage (pour des questions d'évacuation des bulles d'air qui s'échappent par gravité, lors de la mise en oeuvre du BAP, ou de limitation de la poussée exercée sur les coffrages).

- On peut également noter que le délai de recouvrement entre couches de BAP, dans le **cas d'applications horizontales**, doit être suffisamment faible pour qu'un mariage correct puisse se faire (certaines formulations ayant tendance à se gélifier rapidement). Ceci peut impliquer des cadences de mise en oeuvre élevées lorsque les surfaces concernées sont importantes.
- Pour les **applications verticales**, la mise en oeuvre peut se faire par le haut du coffrage (à la benne ou à la pompe) comme pour les bétons ordinaires vibrés, ou par le bas (injection par pompage). Cette dernière possibilité permet d'automatiser la mise en oeuvre et de limiter le personnel en charge du bétonnage
- Pour les **applications horizontales**, l'avantage des BAP réside dans leur facilité de nivellement et de réglage. Les opérations de réglage et de talochage traditionnelles sont supprimées et remplacées par un traitement de surface (à la pénibilité moindre puisqu'il se fait en station debout) à la barre dite « de débullage ».

CHAPITRE 2
LES BETONS FIBRES

• INTRODUCTION :

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. [110]

La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie [111]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée.

Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [111].

I. LES FIBRES

I.1.Introduction :

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton prêt à l'emploi, du béton préfabriqué, béton autoplaçants et du béton projeté. Fabriquées à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose) ou autres, les fibres sont disponibles en diverses formes (rondes, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6 mm et 150 mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75mm Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage. Les principaux facteurs qui contrôlent la performance d'un matériau composite sont [1] :

- a) Les propriétés physiques des fibres et de la matrice
- b) L'adhérence entre les fibres et la matrice

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

- Les fibres sont généralement distribuées à travers toute une section donnée tandis que les barres d'armature ou les treillis d'armature sont disposés seulement là où ils sont requis;

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

I.2.Définition des fibres :

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu. [1]

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

I.2.1 DIFFERENTS TYPES DE FIBRES

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

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

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibre [1]

a- Les fibres métalliques :

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

(fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou) [1]

b - Les fibres de fonte amorphe :

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

c - Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquière de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton. [1]

d - Les fibres de polypropylènes :

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolifère, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où ils apportent les avantages suivants [1] :

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

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

I.3. Propriétés mécaniques des fibres :

1. Gel – dégel :

La fibre ne devrait pas être considérée comme un substitut des manoeuvres prévues pour obtenir une résistance au gel – dégel. Cependant le nombre limité de micro fissurations et la meilleure uniformité du béton renforcé de fibres dosées augmentent la résistance aux cycles gel – dégel, diminuant de conséquence les lézardes en surface. [6]

2.Abrasion :

Grâce à un meilleur contrôle de l'eau de mélange empêchant la concentration de particules fines en surface, le béton renforcé de fibres dosées possède de meilleures caractéristiques d'uniformité. Cela se traduit par une meilleure résistance aux contraintes mécaniques[6]

I.4. critère de choix du type de fibres

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

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles). [110]

Leur géométrie est très variable (figure 37). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [112] et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

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

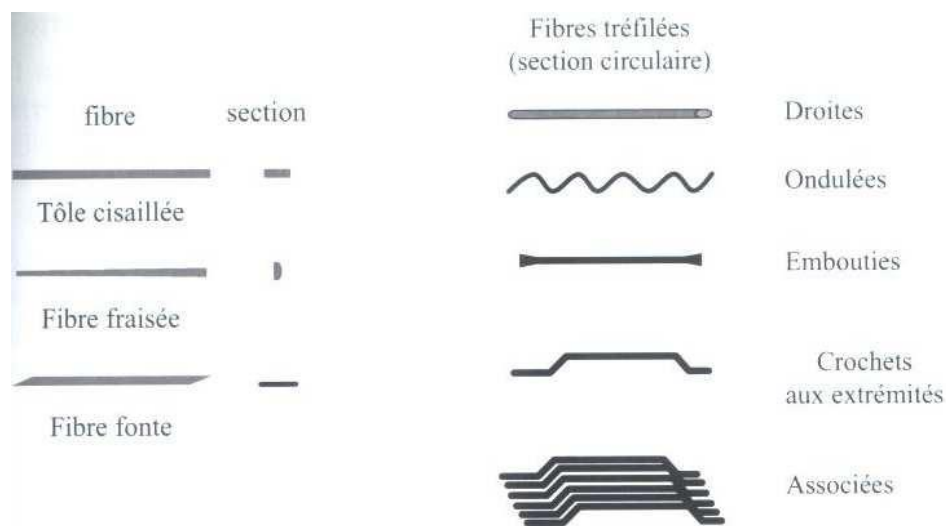


Figure 37 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques [111]

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [111]. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

II. COMPOSITION DES BETONS DE FIBRES :

Les bétons renforcés de fibres ont fait l'objet depuis maintenant une quarantaine d'années d'efforts de recherche importants. Le développement depuis une dizaine d'années de matrices cimentaires performantes a relancé l'intérêt pour l'utilisation des composites cimentaires renforcés de fibres. [114]

On obtient des produits plus ductiles, multifissurants, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue.

Ces matériaux sont très récents pour un secteur comme le génie civil, où innover est difficile. Les composites « ciment - fibres » et « bétons - fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics :

panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation, mobilier urbain...

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections.

Le béton est un matériau poreux et fragile, doté d'une faible résistance à la traction donc sujet à la fissuration. C'est un matériau composite, donc un solide polyphasé dans lequel

tous les constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne peuvent pas atteindre.

Le renfort donne de la résistance mécanique, alors que la matrice unit les fibres, conserve la disposition géométrique des fibres, leur transmet les sollicitations et les protège de l'environnement.

II.1.. Formulation des bétons de fibres

La fabrication d'un béton de fibres ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant [1]. Comme pour tous les bétons modernes, il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. Il n'existe pas encore, comme pour les autres bétons [115], d'outil informatique d'aide à la formulation.

La formulation d'un béton de fibres reste donc une démarche essentiellement expérimentale.

On peut retenir de la littérature quelques grands principes de formulation. Pour une matrice donnée (pâte et granulat), la maniabilité décroît lorsque la quantité de fibres ajoutée augmente.

Pour améliorer l'ouvrabilité, il convient d'utiliser une quantité de fines (sable et ciment) plus importante que pour un béton ordinaire. En ce qui concerne les fibres, plus le rapport longueur sur diamètre (L/d) est élevé, plus grand est le risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en oeuvre et nuisent au comportement mécanique.

De plus, la longueur des fibres doit rester supérieure à deux fois la taille du plus gros granulat ($L > 2D$) pour rendre possible leur action mécanique au niveau des macrofissures.

Le cahier des charges d'un béton de fibres métalliques est en général le suivant :

- un type et une quantité de fibres choisis (en relation avec le comportement en traction visé),
- une taille maximale de gravillon déduite de la relation $L > 2D$ (avec un diamètre N maximum le plus gros possible pour des raisons économiques et de compacité),
- une résistance à la compression à 28 jours,
- une maniabilité (temps d'écoulement) correspondant à l'application visée.

Une méthode rationnelle de formulation a été mise au point au cours des années 80.

Elle a pour point de départ la méthode Baron - Lesage de formulation des bétons. Elle est basée sur les deux postulats suivants :

pour un rapport (massique) eau sur ciment (e/c) et une quantité de pâte ($e+c$) donnés, le béton le plus compact a une maniabilité optimale,

- l'optimum de compacité (déterminé par la constitution du squelette granulaire : sable plus gravillons) n'est pas modifié lorsqu'on fait varier les quantités e/c et e+c.

On fait l'hypothèse supplémentaire que cela reste vrai dans le cas des bétons de fibres.

II-2. Le béton renforcé de fibres en phase d'hydratation :

L'étude du comportement des matériaux cimentaires au jeune âge est primordiale. Lors du gâchage du béton, de nombreuses réactions se produisent. Celles-ci dépendent de la composition du béton et des conditions environnementales. Il va sans dire que le comportement du matériau à long terme dépend de cet historique qu'il est donc nécessaire de maîtriser. (110).

1. Chimie du béton en phase d'hydratation

1. Hydratation du ciment

Le ciment anhydre est un liant hydraulique, qui réagit au contact de l'eau en durcissant. Il permet de lier les mélanges granulaires auxquels il est intégré.

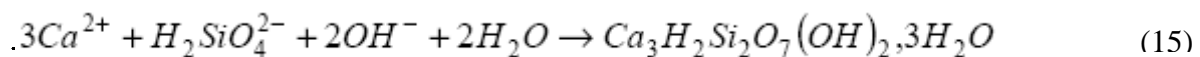
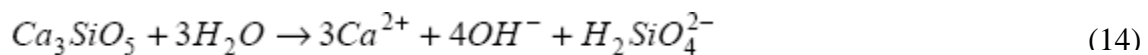
Les ciments utilisés en génie civil sont composés principalement de clinker Portland, qui assure la fonction de liant, et de constituants secondaires. Le clinker Portland est composé de quatre phases :

- Le silicate tricalcique C3S ($3CaO.SiO_2$) 50 à 70% en masse
- Le silicate bicalcique C2S ($2CaO.SiO_2$) 15 à 30%
- L'aluminate tricalcique C3A ($3CaO.Al_2O_3$) 5 à 10%
- L'aluminoferrite tétracalcique C4AF ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) 5 à 15%

L'ajout d'eau au mélange de ciment anhydre permet d'obtenir une pâte de ciment, milieu poreux constitué de phases solides anhydres et hydratées et d'une solution interstitielle remplissant les pores

Hydratation du C3S

Au contact de l'eau, les grains de C3S réagissent immédiatement pour former des C-S-H. Il s'agit de la période initiale dont la durée est de l'ordre de la minute.



Arrive ensuite une période dite "dormante". Lors de cette période de faible réactivité, il se produit une accumulation d'ions Ca^{2+} et OH^- qui ne sont pas consommés par la réaction précédente. La composition de la solution interstitielle devient de plus en plus sursaturée par rapport à la portlandite jusqu'à ce qu'il y ait précipitation de celle-ci.



La phase suivante est la période de prise. C'est lors de cette période que les réactions d'hydratation s'accroissent. La précipitation de la portlandite produit un effet de « pompe à calcium » qui augmente la cinétique de réaction de formation des C-S-H. Il s'en suit une période de durcissement. La couche d'hydrate qui enrobe les grains de silicate anhydre devient de plus en plus importante et donc diminue la diffusion de l'eau et des ions ce qui entraîne un ralentissement des réactions.

La réaction globale des réactions d'hydratation des C3S s'écrit :



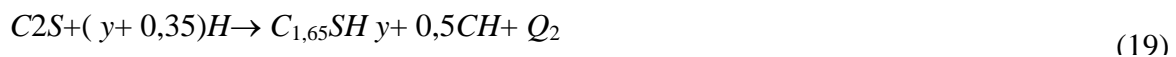
Bien que la stoechiométrie évolue au cours de l'hydratation, on considère une valeur pour le rapport C/S de 1,65 Taylor propose une valeur de y de 3,91 pour un matériau saturé, y dépendant de l'humidité relative interne. On a donc :



Où Q_1 est la quantité de chaleur dégagée par la réaction

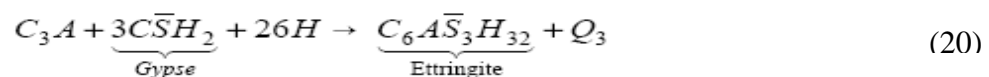
Hydratation du C2S

Les réactions d'hydratation des C2S sont semblables à celles des C3S. Les principales différences sont une cinétique plus lente, une plus faible teneur en portlandite (CH) et une plus faible exothermicité. La réaction globale s'écrit pour un rapport C/S de 1,65 :

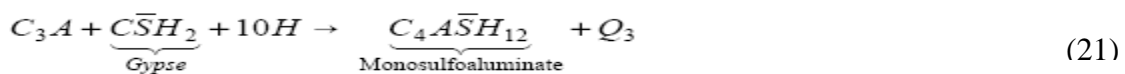


Hydratation du C3A

La réaction du C3A est très rapide et entraîne un dégagement de chaleur très important. Cette réaction produit une rigidification rapide de la pâte par formation de C3AH6. Pour maîtriser ce phénomène de prise rapide, on ajoute du gypse pour contrôler la réaction qui s'écrit alors sous la forme :



Une fois le gypse consommé, la solution sous saturée vis-à-vis de l'ettringite va entraîner une dissolution de celle-ci pour former du monosulfoaluminate. La réaction globale s'écrit :



La quantité de gypse introduite va donc influencer sur les quantités de C₃AH₆, d'ettringite et de monosulfoaluminate dans la pâte.

Hydratation du C₄AF

L'hydratation du C₄AF est comparable à celle du C₃A mais la vitesse de réaction est plus lente, la chaleur dégagée est plus faible et les hydrates formés vont contenir du Fe₂O₃.

Les réactions d'hydratation du C₃S et du C₃A sont rapides puisqu'elles se produisent surtout les 28 premiers jours puis n'évoluent que très peu par la suite. Au contraire, l'hydratation du C₂S et du C₄AF peut se poursuivre pendant plusieurs mois.

Les principaux hydrates formés, qui constituent 90% en masse de la pâte de ciment sont la portlandite Ca(OH)₂, les silicates de calcium hydratés C-S-H, l'ettringite (3CaO.3CaSO₄.Al₂O₃.32H₂O) notée AFt et le monosulfoaluminate de calcium (3CaO.CaSO₄.Al₂O₃.12H₂O) noté AFm. Les proportions de chaque hydrate sont présentées dans le tableau 1

Composants	C-S-H	Portlandite	AFt et AFm
Pourcentage en masse	70	20	10

Tableau01 : Composition minéralogique indicative du clinker hydraté

A l'état initial, le pH est imposé par les alcalins dans le matériau à une valeur supérieure à 13. Bien qu'elle ne joue pas un rôle important au niveau des propriétés mécaniques, la portlandite va servir de tampon acido-basique et imposer à la solution interstitielle un pH aux environs de 12,5.

Les silicates de calcium hydratés C-S-H sont à l'origine des principales propriétés de la pâte de ciment durcie. Ils forment la structure de base de la pâte, assurent une part essentielle dans la résistance mécanique des matériaux cimentaires et sont responsables notamment de la prise. La caractérisation des C-S-H se fait par l'utilisation du rapport C/S où C désigne la quantité d'oxyde de calcium CaO et S la quantité de Silice SiO₂. Ce rapport varie entre 1,5 et 2 pour les ciments Portland.

.2. Porosité :

La porosité de la pâte de ciment joue un rôle non négligeable sur les propriétés du matériau et notamment sur les propriétés de transfert. La taille des pores peut varier entre 1 nanomètre et 1 millimètre. Ils sont généralement classés par familles correspondant à leur taille :

- les pores des hydrates qui sont les plus petits. Ils varient entre le nanomètre et la dizaine de nanomètres. Ils correspondent aux espaces entre les feuillettes de C-S-H ou entre les particules du gel. Cette porosité est approximativement constante quel que soit le degré d'hydratation (28% de la porosité totale) [110] ;

- les pores capillaires dont la taille varie de 10 à 500 nanomètres. Il s'agit des espaces non comblés entre les grains de ciment par les hydrates. Cette porosité va évoluer avec l'avancement des réactions d'hydratation et le rapport E/C ;

- la dernière classe de pore, dont la taille peut aller jusqu'à une échelle millimétrique correspond à la porosité due aux bulles d'air entraînées, aux microfissures et fissures apparaissant lors de l'exploitation du matériau voire aux défauts de mise en oeuvre.

La présence de granulats modifie l'arrangement des grains de ciment par effet de paroi et la distribution de l'eau dans le mélange. Ceci entraîne des modifications locales du rapport E/C. Cette zone autour des granulats est appelée « auréole de transition ». Cette répartition des rapports E/C autour des granulats engendre des valeurs de porosité plus élevées dans l'auréole de transition plus faibles dans la pâte. [110]

C'est la porosité interconnectée qui va influencer sur les valeurs des propriétés de transfert. Plus cette porosité sera importante, plus la diffusion sera grande

.3. Effets des additions minérales, granulats, fibres :

Les additions minérales dite « pouzzolaniques » sont des additions renfermant de la silice ou de l'alumine. La silice réactive, notamment, va réagir avec l'hydroxyde de calcium de la pâte de ciment pour créer des C-S-H « secondaires », les C-S-H « primaires » étant ceux obtenus par hydratation directe du C3S et du C2S.

Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des poudres minérales fines obtenues par dépoussiérage des fumées émises par des chaudières brûlant du charbon. Leur composition est variable puisqu'elles dépendent de l'origine des charbons et du mode de combustion.

Les cendres entraînent un accroissement de la porosité et de la taille des pores aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratation. A plus long terme, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés et entraînent une porosité totale du même ordre de grandeur, mais aussi une diminution de la taille des plus gros pores. Le développement de ces réactions nécessite la présence d'eau d'où l'importance de la conservation du matériau dans une ambiance humide durant la phase d'hydratation.

Les fumées de silice

Les fumées de silice sont des poudres minérales très fines obtenues par condensation et dépoussiérage des fumées de fours utilisés pour la constitution de silicium ou d'alliages tel que le ferro silicium. Leur emploi avec un fluidifiant permet de réduire la quantité d'eau pour une consistance donnée, la porosité ainsi formée est donc réduite. Les fumées de silice réduisent les dimensions des plus gros pores, modifient la structure des C-S-H formés par réaction pouzzolanique et diminuent les valeurs des rapports C/S

Les laitiers de hauts fourneaux :

Les laitiers vitrifiés de hauts fourneaux résultent de la fusion des stériles présents dans le minerai de fer. Il s'agit d'un liant hydraulique latent qui renferme de la silice, de la chaux, de l'alumine et du magnésium. C'est la trempe du laitier en fusion à la sortie du fourneau qui donne un produit vitrifié (la teneur en phase cristalline est d'environ 10%). Le matériau est donc instable thermodynamiquement et forme des silicates et des aluminates de calcium en présence d'eau (composé hydraulique latent). Son hydratation est plus lente que celle du clinker nécessitant une conservation en ambiance humide plus longue. Au jeune âge, il se forme d'avantage d'ettringite mais les résistances initiales sont plus faibles.

Le béton

Il s'agit d'un mélange d'eau, de ciment et de granulats (sable et gravillons). Après la prise, il se forme un milieu poreux constitué d'un squelette granulaire, de pâte de ciment hydratée et de vides occupés par de l'air ou par une solution interstitielle chargée en ions calcium, hydroxyles et alcalins (K⁺, Na⁺).

Les granulats modifient les propriétés de transfert par rapport à une pâte de ciment. Lors des réactions d'hydratation, il se forme une zone plus poreuse aux interfaces pâte-granulats qui favorise les processus de diffusion. Il s'agit des auréoles de transition. En revanche, les granulats sont généralement imperméables et sont donc des obstacles qui ralentissent les transferts. La présence de granulats augmente la longueur à parcourir lors d'un phénomène de diffusion et va donc diminuer les valeurs des coefficients de diffusion effectifs.

Le béton renforcé de fibres

L'ajout de fibres dans le béton vient améliorer la ductilité et le comportement post fissuration

4. Influence du dosage en fibres

- ***Optimisation rhéologique***

L'ajout de fibres dans un béton à l'état frais nécessite de nombreuses précautions notamment pour éviter la formation de pelotes et limiter le risque d'une orientation non préférentielle.

La durée du malaxage influe sur la répartition des fibres au sein du béton frais. Si elle est trop

courte, les fibres ne peuvent pas se répartir de manière homogène. Si elle est trop longue, la répartition peut devenir hétérogène du fait de la ségrégation des fibres.

La maniabilité du béton est diminuée par l'ajout de fibres. Plus la quantité de fibres et leur élanement sera fort, plus l'ouvrabilité du mélange sera affecté. Il est donc important d'utiliser des fibres de dimensions optimales et d'ajuster la composition de la matrice afin de permettre au béton de conserver une maniabilité suffisante.

Lors de la mise en place dans les moules, il faut limiter l'écoulement qui est responsable de l'orientation préférentielle des fibres dont nous parlerons plus spécifiquement dans le paragraphe suivant. L'orientation peut aussi être due à la vibration qu'il est important de limiter voir de supprimer en travaillant avec des bétons autoplaçants et à l'effet de paroi, ce dernier étant plus difficile à contourner.

- ***Optimisation mécanique***

La quantité de fibres dans un béton est une caractéristique prépondérante vis-à-vis du comportement post fissuration. Soit deux fibres, l'une perpendiculaire au plan d'une fissure, l'autre inclinée par rapport à cette fissure. Si les deux fibres sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, elles agissent indépendamment vis-à-vis de la fissure, la fibre perpendiculaire étant plus efficace que la fibre inclinée. Le bilan du couple se résume alors à la somme de leurs actions individuelles. En revanche, si la distance entre les deux fibres est telle que l'action de la fibre qui travaille le mieux conduit, en outre, à confiner la fibre qui fonctionne le moins bien (c'est-à-dire provoquer une étreinte autour de cette fibre), cette dernière verra donc son efficacité vis-à-vis de la fissure accrue. Le bilan devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier de synergie positive.

Au contraire, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres, il arrive un moment où la quantité de pâte de ciment qu'il y a entre elles devient tellement faible que l'enrobage de chaque fibre devient insuffisant (même si l'on augmente la quantité de pâte de ciment avec le pourcentage de fibres pour des raisons de maniabilité) pour assurer un fonctionnement correct de l'interface pâte-fibre. Les fibres travailleront moins efficacement que si elles avaient travaillé sans interactions. Le bilan est alors la somme de leurs actions individuelles moins un effet qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier de synergie négative. A partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moins elles seront efficaces individuellement, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution.

5. Influence de l'orientation préférentielle des fibres:

Plusieurs études ont été effectuées afin de montrer l'influence de l'orientation préférentielle des fibres sur le comportement mécanique des bétons(85) . Casanova, (116) après avoir coulé un bloc de béton en orientant les fibres verticalement, a carotté ce bloc dans trois directions. Il a ensuite effectué des essais de flexion 3 points et ainsi caractérisé l'influence de l'orientation des fibres. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 38

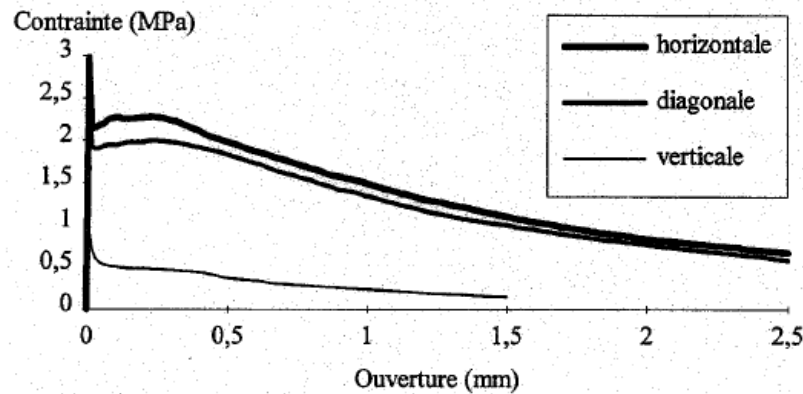


Figure 38 : Influence de l'orientation des fibres sur le comportement en flexion

[116]

Lorsque les fibres sont orientées perpendiculairement à l'axe de la fissure (cas de l'orientation horizontale), les fibres jouent leur rôle de couture de la fissure et permettent d'obtenir des résistances résiduelles importantes pour de grandes ouvertures de fissures. A l'inverse, lorsqu'elles sont orientées parallèlement à l'axe de la fissure, il n'y a pas, ou peu, de fibres pour coudre la fissure, on retrouve donc un comportement post fissuration semblable à celui d'un béton sans renfort de fibres. Le cas des fibres orientées en diagonales montrent que celles-ci cousent aussi la fissure et permettent d'avoir un comportement post fissuration intéressant mais un peu moins important que celui des fibres orientées de façon optimale. Pour éviter une orientation préférentielle des fibres, il convient de prendre un maximum de précaution lors du coulage du béton pour bien les répartir dans l'élément. Une solution consiste à modifier les bétons afin qu'ils deviennent autoplaçants et qu'ils ne nécessitent plus de vibration. Il faut être aussi prudent lors du coulage et éviter de faire parcourir au mélange des distances importantes aussi bien dans les manchons que dans les coffrages. Les conclusions des essais de laboratoire sont à considérer avec précaution si on ne peut pas reproduire par la suite les conditions de mise en place in-situ.

6. ROLE DES FIBRES

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité [117]. Il n'a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure 39-a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure 39-b).

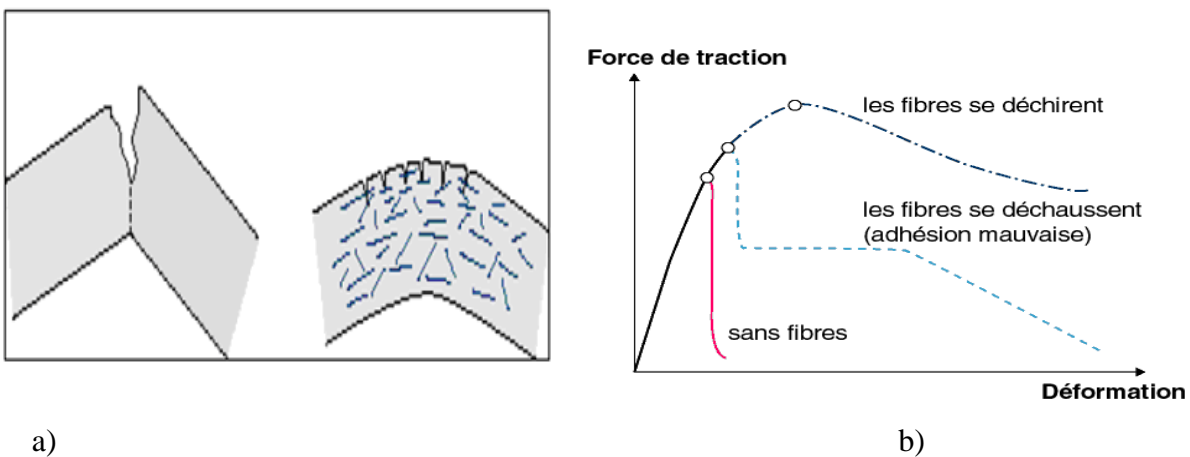


Figure 39 Illustration de l'apport du renfort par des fibres. [118]

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

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

7. PRINCIPE D'ACTION DES FIBRES :

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

le matériau et la structure. Considérons une pièce de béton renforcé de fibres soumise à un effort de traction [85]. On peut distinguer 3 phases sur la courbe contrainte - déformation qui représente son comportement (Figure 40). Une première phase où l'on observe la formation de microfissures qui se développent très tôt, généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice

La longueur de ces fissures est de l'ordre du diamètre des granulats, leur largeur de l'ordre du micron. Durant cette phase, les fibres sont inactives. La deuxième phase correspond au développement des macrofissures qui résultent de la coalescence des microfissures. A ce stade, des contraintes sont transférées aux fibres qui contribuent à limiter la propagation des fissures. Cette étape est suivie par la propagation d'une macrofissure (phase 3) séparant l'éprouvette en deux blocs, et provoquant ainsi la ruine de l'éprouvette [119] [120] [121] [122]

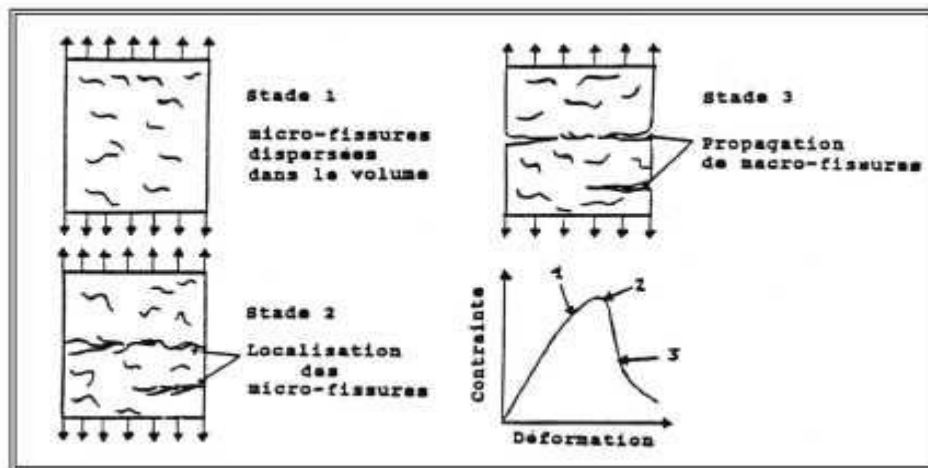


Figure 40 Processus de fissuration du béton [123]

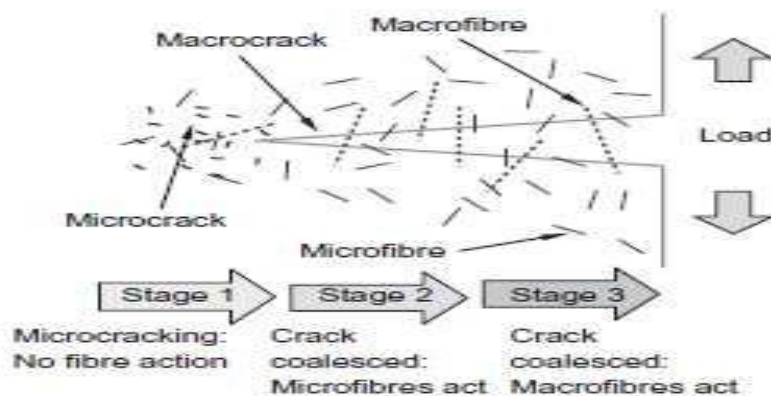


Figure 41 Schéma de l'interaction des fibres avec le développement des fissures dans un composite. [125]

Le mécanisme de couture des fibres assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration et à la limitation de la propagation des fissures et confère ainsi une ductilité au béton. [131]

Le but principal du renfort par des fibres est d'augmenter la résistance à la traction et la ductilité du béton, alors que pour les fibres sont introduites non pas dans le but d'améliorer la résistance à la traction, mais essentiellement pour contrôler la fissuration et changer le comportement du matériau fissuré en pontant les fissures [132]. Sous un effort de traction, les fissures se développent dans la matrice et les fibres peuvent les couvrir, et ainsi augmenter la résistance à l'ouverture des fissures et retarder leur propagation. Pendant l'ouverture des fissures, les fibres vont, suivant leur nature et leur capacité d'adhérence avec la matrice, plus ou moins se déformer ou glisser.

Dans une structure, l'idéal est que la capacité à la traction des fibres soit utilisée de façon optimale dans ce processus, c'est à dire jusqu'à un niveau qui est proche de la résistance à la rupture de la fibre.

8. COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS RENFORCES DE FIBRE

On se propose d'analyser le comportement mécanique des bétons de fibres tel qu'il est rapporté dans la littérature, à la lumière des mécanismes physiques décrits ci-dessus.

Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres [85]. La démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres. On conçoit donc qu'on ne compare pas, en termes de maniabilité, ni de résistance, des bétons identiques. Rossi propose donc de comparer des bétons optimisés en termes de maniabilité (donc de compacité) : on formule, d'une part, un béton témoin et, d'autre part, un béton de fibres, tous deux par la méthode Baron - Lesage en gardant la même valeur du rapport e/c et les mêmes constituants de la matrice (en nature mais pas en quantité), et on compare des bétons ayant la même maniabilité [135]

8.1. Résistance à la compression:

- *Comportement en compression uniaxiale :*

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression uniaxiale a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée. De plus, la résistance du béton en compression est presque invariablement

l'élément clé lors de la conception des structures en béton et lors de l'établissement des spécifications de conformité [136].

-Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences. Cependant, ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution.

Enfin, il faut rappeler l'influence de l'orientation préférentielle des fibres. Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum. [136]

Des essais en compression biaxiale ont montré que le contrôle de la fissuration par les fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de l'effort maximal appliqué [136]

8.2. Résistance à la flexion

Les essais de flexion qu'on appelle aussi « traction par flexion » ont l'avantage de retranscrire de manière plus réaliste ce qui se passe dans beaucoup d'éléments structuraux [136].

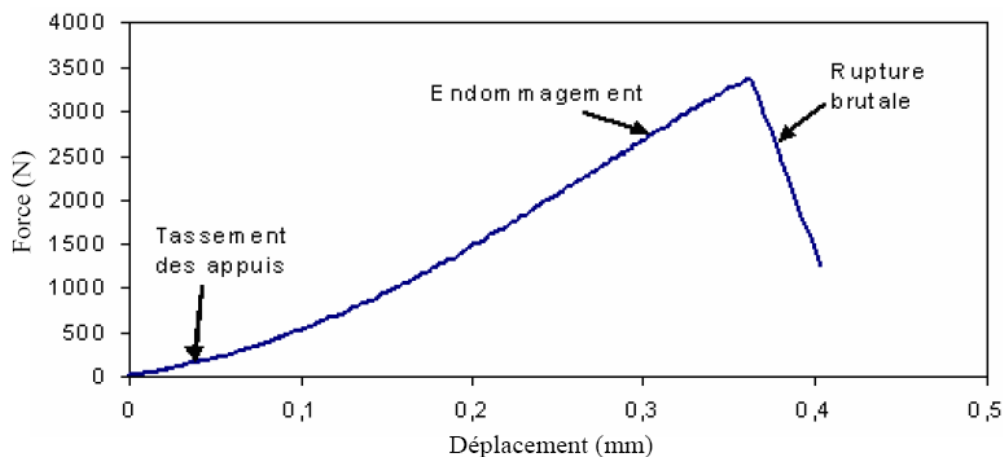


Figure 42. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières) [137]

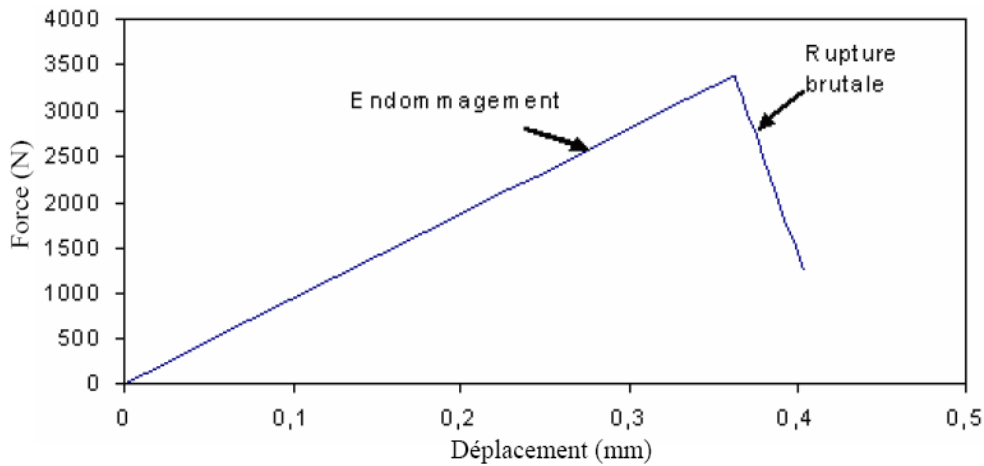


Figure 43. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (avec des précautions particulières) [137].

Cette dernière figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour le béton, obtenue à partir d'essais statiques en flexion 3-points. L'évolution de la charge se déroule en deux phases : dans la première phase, la force augmente linéairement avec le déplacement pour atteindre la charge maximale, cette phase entraîne la propagation de microfissures d'interface et la propagation de microfissures dans la matrice; dans la deuxième phase une diminution brusque de la charge est observée, conduisant à la rupture de l'éprouvette.

8.3.. Comportement en traction

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macrofissuration

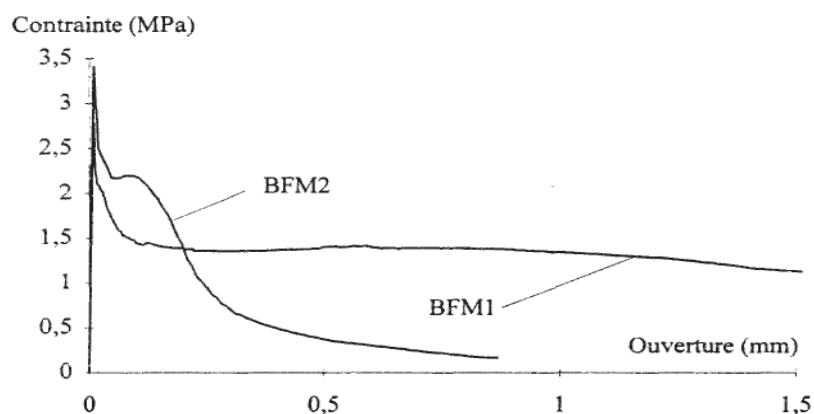


Figure 44 - Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée, pour une fibre fonctionnant par ancrage de forme (BFM1 : fibres à crochets en acier tréfilé - longueur 60 mm, diamètre 0,8 mm- dosées à 50 kg/m³; $f_c = 27,5\text{MPa}$) et une autre par adhérence (BFM2 : fibres rubans en fonte amorphe -longueur 30 mm, largeur 1,7 mm- dosées à 30 kg/m³; $f_c = 40\text{MPa}$). [137]

De nombreux auteurs utilisent des essais de traction "indirecte": l'essai de fendage ou l'essai dit de "module de rupture" (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint). Le problème est qu'on cherche à tirer de ces essais une résistance intrinsèque à la traction, alors qu'ils intègrent un mécanisme de structure. On mesure donc, indirectement, l'effet de couture des fibres à travers une macrofissure, mais cette mesure est soumise à des effets d'échelle importants.

Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements. Avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction. Une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure. La Figure 45 montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe.

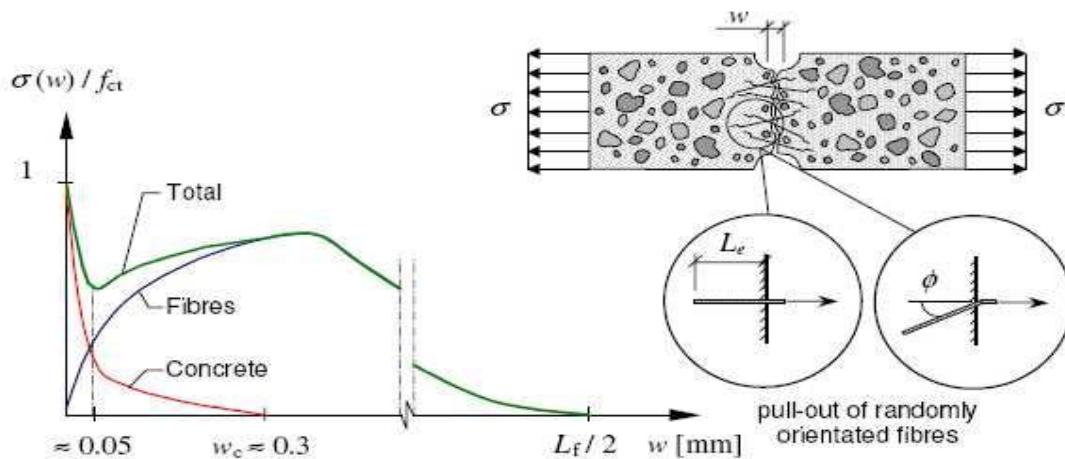


Figure 45 : Contribution des fibres dans le comportement à la traction [126].

8.4. Comportement en fatigue

.1 .Phénomène de fatigue :

On entend par phénomène de fatigue, la dégradation progressive d'une structure soumise à des sollicitations fluctuantes ou répétées, qui se traduit par l'apparition et le développement de fissures qui progressent avec le nombre de cycles appliqué. Ce processus à caractère irréversible altère les propriétés mécaniques macroscopiques du matériau et peut conduire à la rupture pour un niveau de chargement inférieur à sa résistance statique si le nombre de cycles appliqué est suffisant. [136]

La représentation classique des résultats d'essais de fatigue est la courbe de fatigue ou la courbe de Wöhler (fig. 46). Cette courbe fait correspondre une durée de vie à un niveau de sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée. [136]

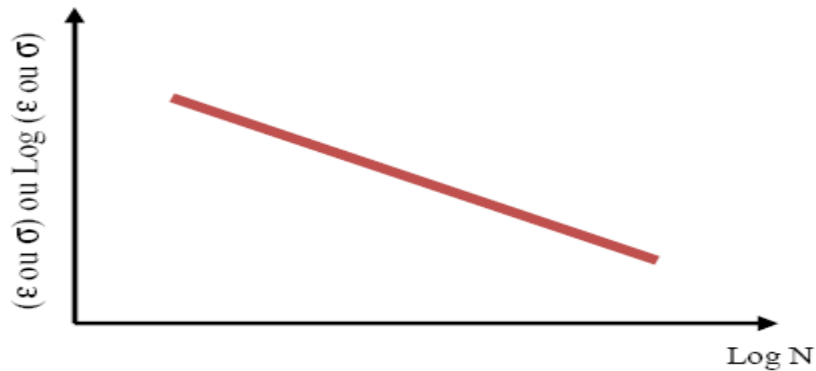


Figure 46 : courbe de Wöhler

.2. Types de sollicitations dans les essais de fatigue :

La tendance générale est d'utiliser des sollicitations simples comme un chargement sinusoïdal avec ou sans période de repos.

Les signaux de la figure 47 sont des cas particuliers de sollicitations qui sont exercées uniquement en compression (typiquement utilisées dans l'essai de traction indirecte). Par contre dans la plupart des essais de fatigue, les sollicitations sont centrées pour obtenir un chargement du type traction/compression alternée. En ce qui concerne la forme du signal, mis à part celles montrées dans la figure 47, il existe aussi d'autres types des chargements (triangle, trapèze ...), ou une combinaison de ces différents signaux.

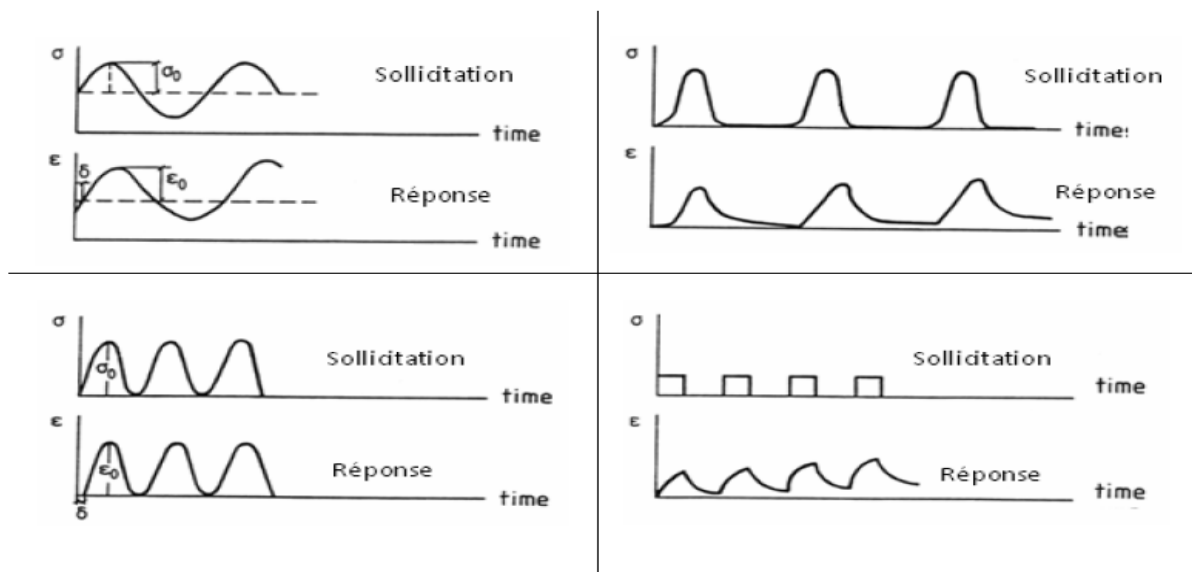


Figure 47. Quelques signaux de chargement en contrainte et leur réponse en déformation dans les essais de fatigue [141].

9. UTILISATION ET INFLUENCE DE DEUX OU PLUSIEURS TYPES DE FIBRES :

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

Le choix du type de fibres utilisées est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. S'agissant de la nature, la fibre métallique est la plus utilisée.

Dans le cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement.

La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité

(voir Figure 48 a et b) [85].

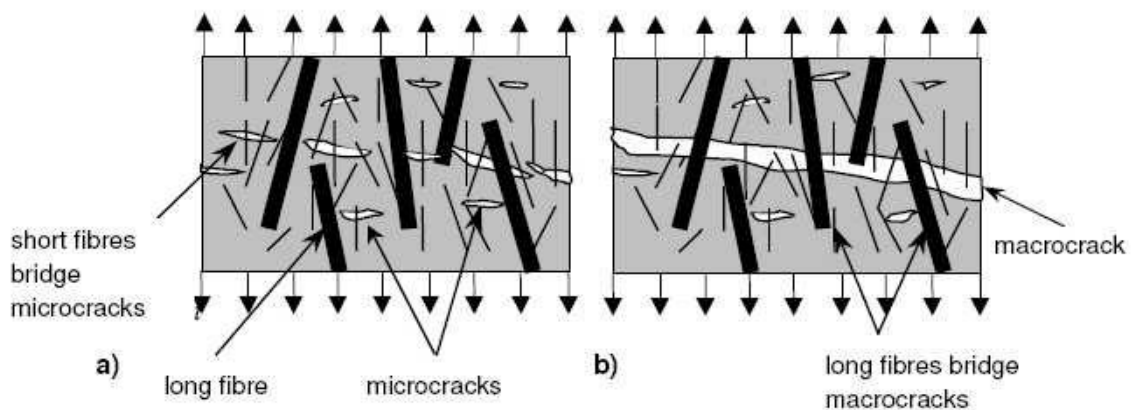


Figure 48 : Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus decouture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures. [146]

CHAPITRE 3
LES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES

BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES :

1-INTRODUCTION :

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

En effet, ce béton de dernière génération se caractérise par une excellente maniabilité qui lui permet de se mettre en place sous l'effet de la simple gravité. L'absence de vibration de ces matériaux évite une distribution hétérogène des fibres dans la matrice [85].

Bien que le béton autoplaçant renforcé de fibres soit pour l'instant peu utilisé, des chercheurs ont montré qu'il peut être une solution appropriée pour les applications sur poutres en I en béton précontraint, au niveau des zones fortement ferraillées afin de contrôler la fissuration [102]. L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement. [87] Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « SLUMP FLOW » et l'essai d'étalement modifié dit « J-RING » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage. Pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré).

2-LES PROPRIETES DES BETONS AUTOPLAÇANTS FIBRES A L'ETAT FRAIS:

une étude réalisée par Grunewald un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, [88] du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, les conclusions ci-après ont été tirées [85].

2-a. Essai l'étalement

L'analyse de ces résultats montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la composition du béton de référence. Plus la teneur en sable est élevée, plus l'étalement est affecté. On remarque aussi sur la Figure 49-a une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une

grande surface spécifique (ex : Dramix 80/30 PB), ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions (voir Figure 49-b) avec des fibres plus longues (ex : Dramix 80/60 BN), une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La Figure 58- c illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu (ex : Dramix 65/40 BN).

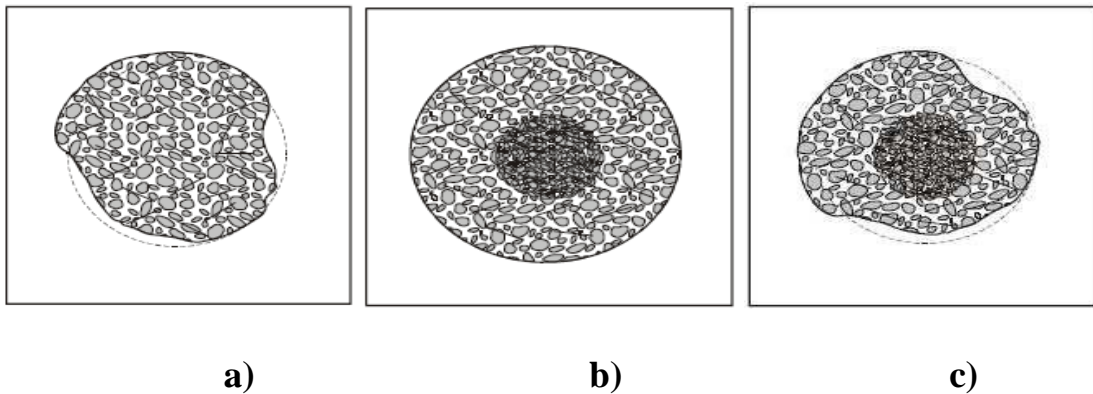


Figure 49 Effets des fibres sur l'étalement des BAP [89]

Sachant que l'élanement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, [Grünwald et Walraven 2001a] [89] se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres V_f et l'élanement. La Figure 50 décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

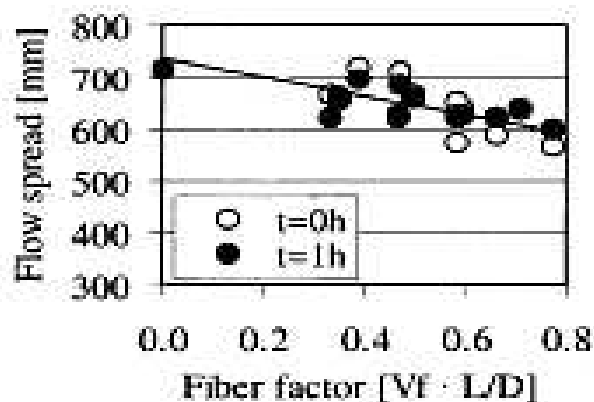


Figure 50 L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [89].

2-b.Essai de V-funnel :

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

On note une augmentation linéaire du temps d'écoulement en fonction du facteur de fibres. Le comportement à l'écoulement des bétons évalué par l'intermédiaire de cet essai dépend essentiellement de la viscosité ainsi que de la taille du plus gros granulats par rapport aux dimensions de l'ouverture de l'entonnoir. La Figure 51 montre que les temps de passage à travers l'entonnoir à $t = 1h$ sont nettement plus élevés qu'à $t = 0h$.

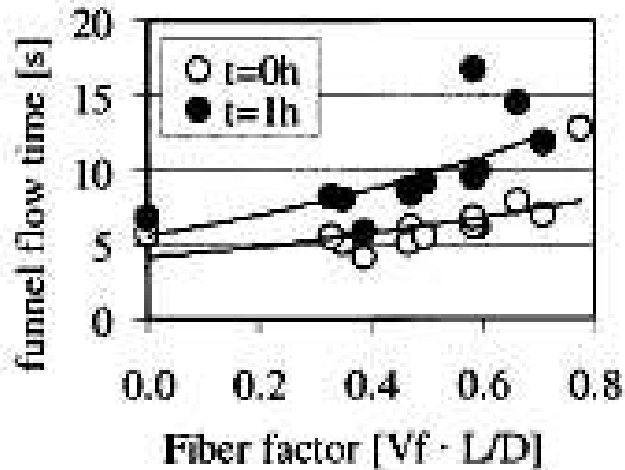


Figure 51 L'évolution du temps d'écoulement à travers l'essai V-Funnel en fonction du facteur de fibres. [89]

2-c.Essai J-RING :

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

Tableau 02 Recommandation concernant l'espacement normalisé des barres afin d'éviter le blocage dans les BAP fibrés [91].

c/L_f [-]	L_f/d_f [-]	Max. m_f [kg/m ³]
≥ 3	80	30
	65	60
≥ 2	65	30
	45	60
$\geq 1,5$	45	30

Avec c : espacement entre les barres.

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

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

D'après une étude réalisée par Grünewald et Walraven [89] ont constaté que lorsqu'on augmente le dosage en fibres, la porosité interne du squelette granulaire est plus importante et donc la viscosité plastique est plus élevée. C'est une conséquence du frottement dit « solide » qui favorise la résistance à l'écoulement. Jusqu'à une concentration de fibres métalliques de 1 %, la viscosité plastique accroît avec une pente très faible. Au-delà de cette valeur, cette dernière devient nettement plus grande et l'écoulement du béton frais est quasi nul justifiant ainsi la consistance élevée du milieu. De plus, à taux de fibre donné, cette viscosité est plus importante lorsque les fibres sont longues.

3- ORIENTATION ET DISTRIBUTION DES FIBRES :

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Petersson [92] a réalisé une étude sur la

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

Groth et Nemegeer [93] a aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la

même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion.

- **Concentration critique de fibres :**

Swamy et Mangat [95] ont montré l'existence d'une concentration critique de fibres au delà de laquelle le matériau ne s'écoule plus, quelles que soient ses caractéristiques rhéologiques sans fibre. Ce même constat est rapporté par de nombreux chercheurs [96] [97] [98] [99] qui notent sur BO ou sur BAP un effet accru des fibres sur l'étalement, ou une augmentation soudaine du seuil mesurée au rhéomètre, au delà d'une certaine concentration de fibres. D'une part pour des concentrations supérieures à cette valeur critique, le matériau est rapporté comme étant trop ferme pour s'écouler. D'autre part pour des facteurs d'aspect de fibres trop élevés, des oursins de fibres se forment, rendant le matériau hétérogène.

L'essai présente Figure 52 est réalisé sur une même pate de ciment divisée en trois parts et renforcée avec des fibres droites rigides de concentrations et facteurs d'aspect différents. Sur la figure (a), la pate de ciment renforcée avec 5% (en volume) de fibres de facteur d'aspect 17 semble s'écouler librement et donc présenter des propriétés rhéologiques permettant sa mise en œuvre. Sur la figure (b), cette même pate de ciment renforcée avec 20% des mêmes fibres est devenue trop ferme pour s'écouler. En fin sur la figure (c), les fibres utilisées, d'un élancement supérieur ($r=60$), entraînent la formation d'oursins de fibres constatée par de nombreux chercheurs [100] [101] [102] [103] [104] malgré une concentration de 5% identique à celle de la figure (a). Ces oursins rendent le matériau hétérogène et donc impossible à utiliser sur chantier.

Notre objectif, à partir de cette observation, est de définir une concentration critique au delà de laquelle les fibres empêchent la mise en œuvre du composite. Grünwald [96] a observé qu'un BAP devait satisfaire des critères relatifs à son étalement (taille et forme) et sa stabilité pour.

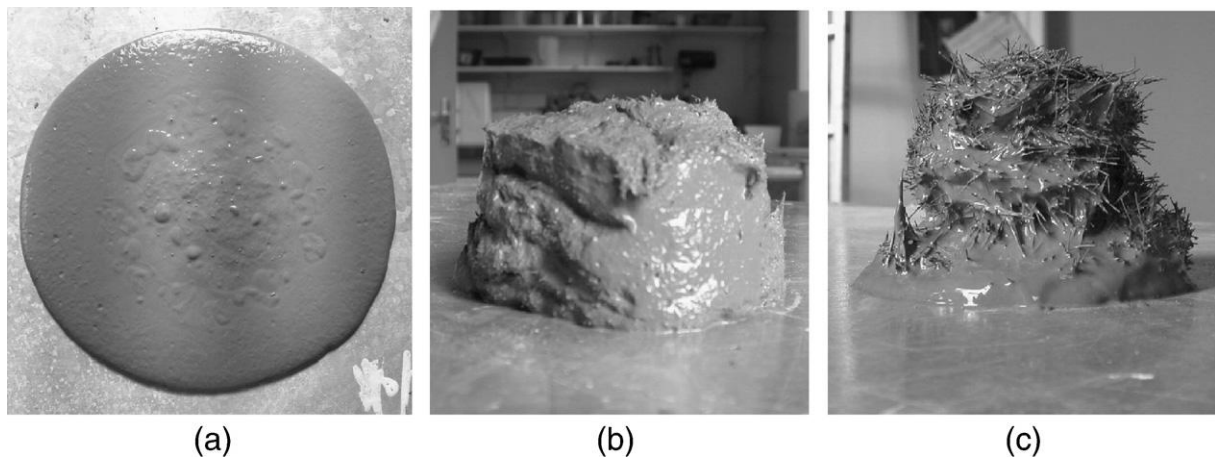


Figure 52 : Illustration de la consistance de pâtes de ciment renforcées avec des fibres de facteurs d'aspect et concentrations différents (a) $\rho_f = 5\%$ et $r = 17$, (b) $\rho_f = 20\%$ et $r = 17$, (c) $\rho_f = 5\%$ et $r = 80$.

4-COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS AUTOPLAÇANT FIBRES:

Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un BAP fibré à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration. Dans cette partie, nous nous limiterons au comportement instantané. Le retrait et le fluage peuvent être considérés comme similaires à ceux des compositions ordinaires [85].

4.1 Comportement à la flexion :

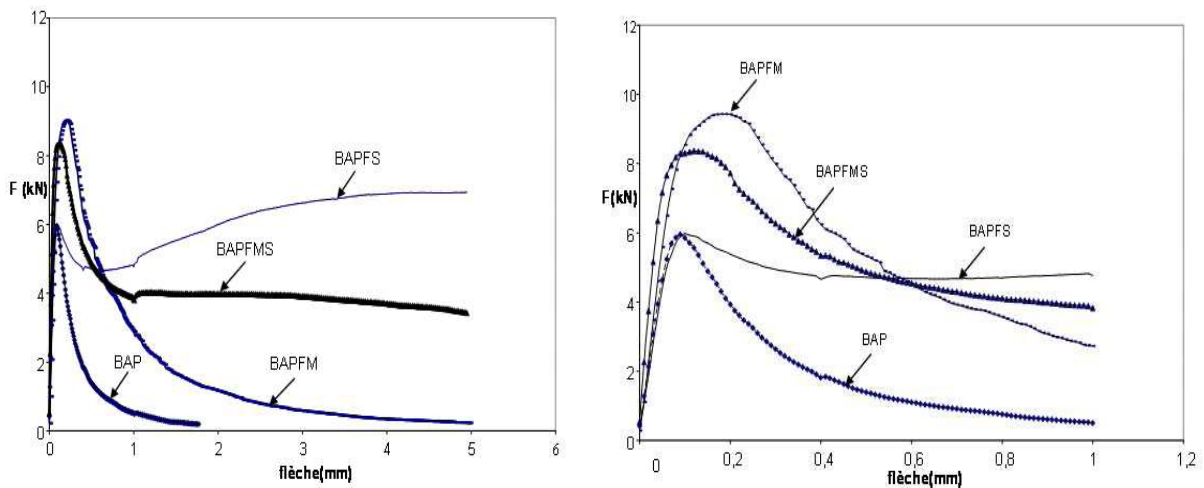
une augmentation de la quantité de fibres conduit à une amélioration de la rigidité, et du comportement en flexion des bétons autoplaçants renforcés de fibres [87]. Les études [105] [106] [107] effectuées sur le comportement mécanique en flexion sous l'influence de deux types de fibres Pour un fibrage mixte ont montré que :

- _ Les fibres métalliques « FM » qui sont réputées très adhérentes à la matrice ont conduit à une augmentation de la capacité portante néanmoins la résistance résiduelle chute rapidement pour des flèches imposées plus élevées.

- _ Les fibres synthétiques « FS » n'ont pas permis d'augmenter la capacité portante, elles confèrent tout de même au système une résistance résiduelle post-pic maintenue jusqu'à des ouvertures des fissures très larges.

- _ L'association des deux types de fibres peut donc constituer un compromis efficace pour améliorer la résistance à la flexion des BAP et prolonger le plateau de la capacité portante résiduelle des structures jusqu'aux larges ouvertures des fissures.

_ Les BAP semblent conférer une adhérence fibre-matrice supérieure par rapport au béton vibré, que ce soit avec des fibres métalliques ou synthétiques. Les Figures ci dessous illustrent la différence des comportements entre les différents bétons en flexion en terme de courbe force-flèche



a) détail jusqu'à une flèche de 6mm

b) détail jusqu'à une flèche de 1mm

Figure 53 Courbe effort-flèche pour différentes compositions. [105]

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

4.2 Comportement à la compression et à la traction :

La résistance à la compression n'était pas significativement sensible à l'adjonction de fibres dans un BAP [105]. La résistance au jeune âge est quelque peu faible, probablement due à un effet retard de l'hydratation des mélanges et/ou des fillers, lié aux adjuvants. Néanmoins, à long terme, la résistance correspond à celle d'un béton ordinaire avec un même rapport E/L. Les résistances à la compression visées à 28 jours ont été atteintes pour tous les types de bétons, avec une très légère diminution des rapports R_{comp}/R_{trac} entre 7 et 28 jours.

Cette réduction modérée est probablement due à l'amélioration de l'adhérence des fibres avec le béton dans le temps, mécanisme dont dépend fortement la résistance à la traction.

Les auteurs en ont tiré les principales conclusions ci-après.

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

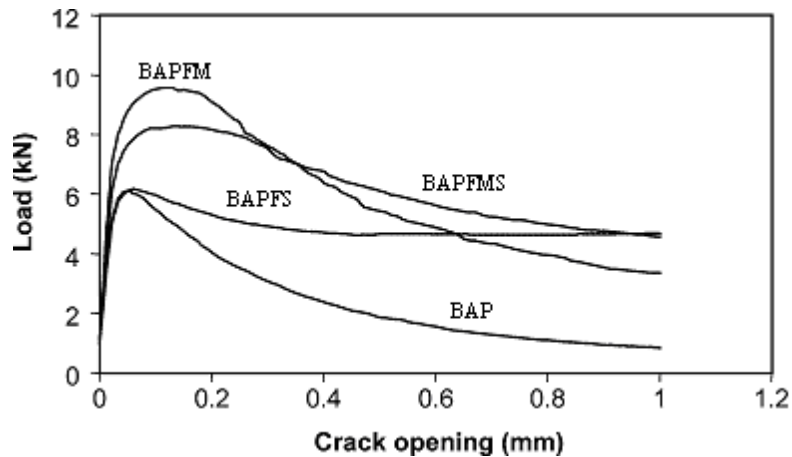


Figure 54 Comportement à la traction de différentes compositions [108]

4-3 LE RETRAIT

Les fibres ne semblent pas modifier le retrait du béton, par contre elles s'opposent à la fissuration provoquées par ce phénomène. Pour un béton ordinaire [109]. Les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles sans fibres. le retrait des BAP fibrés diminue en fonction de l'augmentation de teneur de fibres [77].

5- UTILISATION DES BAP FIBRES DANS LES STRUCTURES

Nous allons présenter quelques exemples d'applications des BAP fibrés dans les éléments de structure [85].

5.1 Palplanches

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

Ces éléments sont précontraints et renforcés avec des barres en acier. Comparés à ceux en

acier, les éléments en béton sont plus durables et peuvent être employés comme partie portante de la charge d'une structure.

Des études ont été réalisées à l'université de technologie de Delft avec pour objectif la production de palplanches précontraintes sans armatures classiques

Le programme était composé de quatre parties:

- étude préliminaire sur les caractéristiques d'un mortier de haute résistance avec les fibres métalliques
- optimisation d'une géométrie de palplanches, en combinant les aspects structural et économique, (le calcul a indiqué que les palplanches avec des bétons autoplaçants fibrés seraient économiques si le prix de la composition était inférieur à 450 euros/m³) ;

La Figure 55 permet de comparer les palplanches élaborées à base de béton autoplaçant renforcé de fibres (Dramix OL 13/0,16, $V_f=125$ kg/m³) à celles à base de béton ordinaire : on remarquera une diminution significative de l'épaisseur des éléments fibrés.

Les palplanches précontraintes en béton autoplaçant renforcé de fibres présentent plusieurs avantages par rapport celles avec un béton standard : le coulage et le remplissage sont facilités, le stockage exige moins d'espace, et un nombre plus élevé d'éléments peut être transporté avec un camion (plus légers et moins encombrants). Enfin, la mise en place dans la terre est plus aisée (moins de résistance à l'enfoncement dans le sol. [85]



Figure 55 Palplanches précontraintes à base de : mortier autoplaçant fibré (a),
béton armé ordinaire (b) [85]

5.2 Voussoirs

Les voussoirs subissent souvent des dommages au cours de la construction. Les fibres, en réduisant la fragilité du matériau, peuvent éviter l'endommagement du béton d'enrobage qui est provoqué par le placement imprécis des voussoirs. Pendant leur durée de service, ils peuvent être accidentellement soumis à une augmentation de la température provoquée par un feu. A titre d'exemples récents et non des moindres, on peut citer les incendies du tunnel du Mont Blanc et du tunnel sous la Manche. Les fibres peuvent contribuer à limiter la détérioration et la désagrégation du béton. L'interface fibre – matrice cimentaire contribue à la décompression du béton (exutoire de la vapeur) et d'autant plus efficacement que les fibres sont réparties dans tout le volume, y compris au voisinage immédiat de la surface de la structure. Des voussoirs renforcés de fibres métalliques ont été testés avec succès dans plusieurs projets d'infrastructures. Dans la plupart des cas, on peut se passer du renfort de barres, simplifiant ainsi le procédé de production.

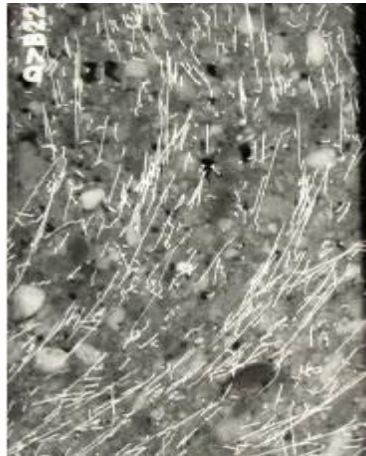
La Figure 56 illustre un voussoir en béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques, et montre la qualité des surfaces après décoffrage.



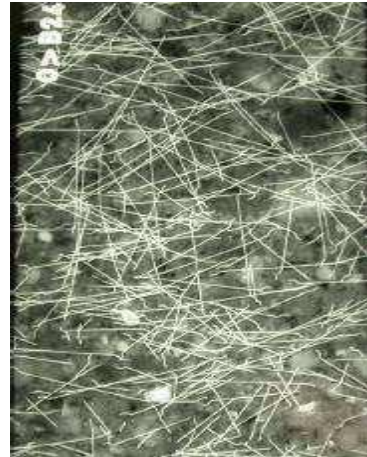
Figure 56 Un voussoir à base de BAP fibré [85]

Des photographies aux rayons X ont été réalisées (Figure 57). Leur analyse met en évidence l'influence de l'écoulement sur l'orientation préférentielle des fibres. Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- l'écoulement affecte les caractéristiques des BAP fibrés à l'état frais, les fibres sont préférentiellement orientées parallèlement à la direction de l'écoulement, cette orientation devient plus prononcée lorsqu'il s'effectue sur une longue distance,
- une bonne corrélation a été trouvée entre la résistance à la traction par fendage (meilleur pour des fibres de longueur 60 mm) et le facteur d'orientation



a)



b)

Figure 57 Photographie aux rayons X au milieu du voussoir le long de l'écoulement (a), Perpendiculairement à l'écoulement (b) [85]

5.3 Eléments poutres

des études ont montré que plus les fibres sont longues, plus elles ont tendance à prendre une orientation préférentielle. Les parois des moules induisent aussi une orientation préférentielle. Ceci a été confirmé par une étude de l'effet d'écoulement et la longueur des fibres sur leurs orientations sur des poutres.

Deux poutres ayant une longueur de 3,7 m, une hauteur de 0,5 m et d'une largeur de 0,2 m ont été coulées.

Deux types de fibres métalliques ayant le même rapport longueur/diamètre ($L_f/D_f = 45$) mais de longueurs différentes (30 et 50 mm) ont été utilisés (Dramix 45/30 BN et Dramix 45/50 BN). La teneur en fibre dans chaque poutre est de 50 kg/m³. Les résultats sur la rhéologie du matériau à l'état frais ont montré que les deux types de fibres ont des effets comparables sur les BAP fibrés. [85]

Plusieurs études ont été effectuées pour déterminer l'effet de l'écoulement sur l'orientation des fibres dans les petites et grandes poutres. L'efficacité des fibres à réduire la fissuration, les performances des BAP renforcés de fibres et la variation des caractéristiques à l'état durci dépendent de l'orientation et de la distribution des fibres.

PARTIE EXPERIMENTALE

I-METHODOLOGIE ET OBJECTIF DU TRAVAIL PRATIQUE :

L'objectif de notre travail consiste à réaliser un béton autoplaçant fibré par l'ajout de deux types de fibres (fibre métallique et fibres de verre) avec des différentes dimensions. Afin de voir l'influence de la nature et les dimensions de ces fibres sur les caractéristiques du béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci et faire une comparaison avec un béton autoplaçant sans fibre.

Et pour cela on a réparti notre travail en cinq parties essentielles :

La première partie : consiste à caractériser tous les matériaux utilisés à savoir :

- Le sable (Beghlia) ;
- Les graviers (Setif) ;
- L'eau ;
- Superplastifiant (polycarboxylates haut réducteur d'eau) ;
- Fibres métallique et du verre ;
- Le ciment (CPJ CEM II/A 42.5 ACC M'SILA) ;
- fillers calcaires

La deuxième partie :

Caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire et détermination du point de saturation en superplastifiant (polycarboxylates haut réducteur d'eau), par viscosimètre et faire la liaison avec la pate utilisée dans le BAP.

La troisième partie :

Est visée à la formulation d'un BAP avec ajout fines (fillers calcaires : 10% de la masse de ciment) à base d'un ciment CPJ CEM II/A 42.5 selon la méthode LGC, puis confection d'un BAP avec ajout de fibres métalliques et de verre (de 30mm, et de 60 mm de longueur et) .

La quatrième partie :

Caractérisation rhéologique et physico-mécanique des bétons obtenus selon les exigences normalisées (étalement, table en L, stabilité sur tamis, résistances mécaniques, etc...).

Cinquième partie :

Présentation et étude des résultats concernant l'influence de la nature et les dimensions des fibres sur les propriétés du BAP et recommandations.

PREMIERE PARTIE :

II-Description des matériaux utilisés :

1. SABLE ET GRAVIER

► Sable de Baghlia :

Tableau 5 : Caractéristiques physiques : (la Norme NF P 18-554)

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
MASSE VOLUMIQUE	2,66	g/cm ³
TENEUR EN EAU	2,30	%
ESV	82,20	%
ESP	77,12	%
Abs	0,975	%
POROSITE	2,73	%

Commentaire : l'échantillon de sable a été soumis aux essais de colorimétrie selon la méthode du laboratoire, on a observé une présence légère de matières organiques

Tableau 6 : Analyse granulométrique : Selon la Norme (NF EN933-1)

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (G)	TENEURS (%)		Mf
	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisats cumulés	
6,3	00	00	100	3,5
5	63	2.32	95,68	
4	115	7.87	92,12	
3.15	185	12.67	87,33	
2.5	287	19.65	80,34	
1,25	627	42.94	57,05	
1	732	50.13	49,86	
0,5	1090	74.66	25,34	
0,315	1294	88.63	11,37	
0,250	1363	93.36	6,64	
0.16	1420	97.26	2,74	
0.125	1430	97.95	2,05	
0.08	1438	98.49	1,51	
Fond de tamis	1460	99.93	0,07	

Commentaire: on remarque que le sable de Baghlia a un module de finesse élevée (3,5), donc, une correction est nécessaire par l'ajout de sable fin (sable de Boussaâda).

► **sable de Boussaâda**

Tableau 7. Analyse granulométrique du sable de Boussaâda (NF EN933-1)

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (G)	POURCENTAGE (%)		Mf
	Refus cumulé	Refus cumulé	tamisats cumulés	
1.25	0	0	100	0.88
1	1	0.1	99.9	
0.630	3	0.3	99.70	
0.5	8	0.8	99.20	
0.315	83	8.33	91.67	
0.250	292	29.32	70.86	
0.160	784	78.71	21.29	
0.125	868	87.15	12.85	
0.080	929	93.27	06.73	
0.063	970	97.39	02.61	
Ft	974	97.79	02.21	

On a fait la correction du sable de Baghlia par le sable de Boussaâda (sable fin) selon la méthode d'Abrams, on a trouvé les fractions suivantes :

- Sable de Baghlia = 61.83%
- Sable de Boussaâda = 38.16%

La vérification est faite par l'analyse granulométrique par tamisage

Tableau 8 : Analyse granulométrique du sable corrigé : Selon la Norme (NF EN933-1)

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (G)	TENEURS (%)		Mf
	Refus cumulé	Refus cumulé	tamisats cumulés	
6,3	9	0.77	99.23	
5	21	1.79	98.21	2.5
4,00	50	4.27	95.73	
3,15	133	11.37	88.63	
2,5	288	19.49	80.59	
1,25	430	36.75	63.25	
0,63	573	48.97	51.03	
0,315	746	63.76	36.24	
0,16	974	83.27	16.75	
0,125	1078	92.14	7.86	
0,08	1121	95.81	4.19	
Fond de tamis	1124	96.07	3.93	

Commentaire : d'après les résultats obtenus sur le sable, on peut dire qu'il répond aux exigences de la norme (NF EN933-1) pour qu'il soit utilisé dans les bétons.

► **Gravier 3/8 de SETIF :**

Tableau 9 : Caractéristiques physiques : Selon La Norme NF 18-554

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
MASSE VOLUMIQUE	1,34	g/cm ³
Masse spécifique	2.73	g/cm ³
Teneur en eau	0.15	%
Absorption	0,575	%
Porosité	1.527	%
Los angles	24.27	%
Micro-Deval	14.6	%
Coefficient d'aplatissement	19.19	%

Tableau 10 : Analyse granulométrique du gravier 3/8 Selon la Norme (NF EN933-1)

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (g)	TENEURS (%)	
	Refus cumulé (g)	Refus cumulés	Tamisât cumulés
10	28	1,4	98,6
8	182	9,1	90,9
6.3	868	43,4	56,6
5	1847	92,35	7,65
4	1912	95,6	4,4
3.15	1972	98,6	1,4
2	1993	99,65	0,35
0.63	1995	99,75	0,25
FT	1997	99,85	0,15

► GRAVIER 8/15 (SETIF) :

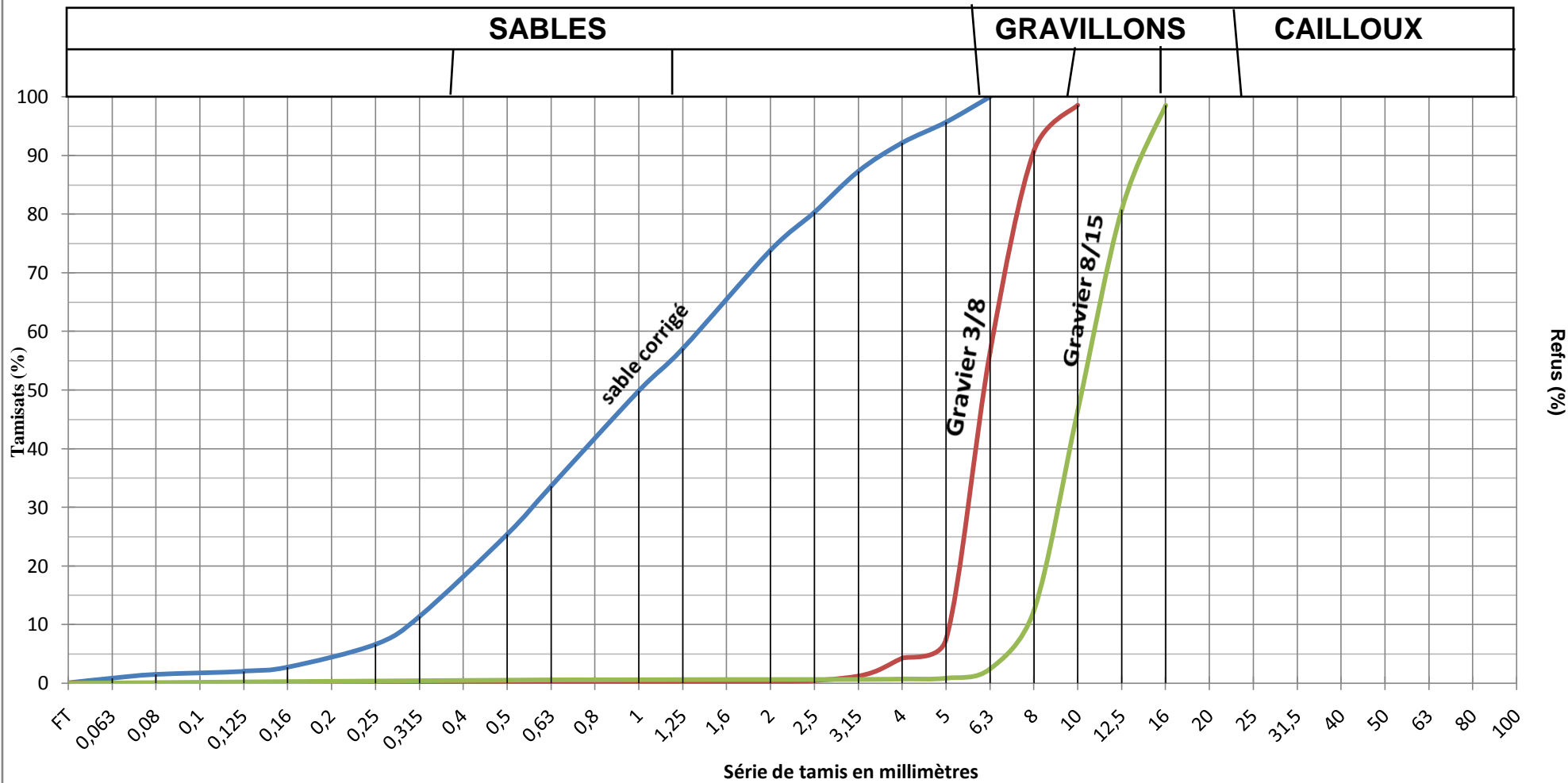
Tableau 11. Caractéristiques physiques

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	UNITES
Masse volumique	1,40	g/cm ³
Teneur en eau	0,30	%
Micro Deval	13.6	%
Los Angeles	25,06	%
Absorption	0,40	%
Porosité	1,06	%

Tableau 12 : Analyse granulométrique : Selon la Norme (NF EN933-1)

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	POIDS (G)		TENEURS (%)	
	Refus cumulés		Refus cumulés	Tamisats cumulés
20	00		00	100
16	43		1.43	98.56
14	298		9.93	90.06
12,5	576		19.2	80.8
10	1602		53.4	46.6
8	2618		87.26	12.73
6,3	2918		97.26	2.73
5	2965		98.83	1.16
4	2969		98.96	1.03
3.15	2971		99.03	0.96
0.63	2975		99.16	0.83
Fond tamis	2991		99.7	0.3

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE



2. **CIMENT** : le ciment utilisé ACC CEM II/A M'sila CPJ 42.5

Tableau 13 : Caractéristiques physiques selon la norme NF EN 196-3,

Caractéristiques	résultats	Unités
Consistance normale	29,2	%
Début de prise (Dp)	110	mn
Fin de prise (Fp)	220	mn
Mv(absolue)	3,06	g/cm ³
Surface spécifique (SSB)	3100	cm ² /g
Expansion à chaud	1,75	mm
Retrait à 3 jours	194	µm/m
Retrait à 7 jours	381	µm/m
Retrait à 28 jours	600	µm/m
Gonflement à 3 jours	0	µm/m
Gonflement à 7 jours	0	µm/m
Gonflement à 28 jours	0	µm/m

Tableau 14 : Caractéristiques mécaniques : selon NF EN 196-1,

RESISTANCE (MPa)	AGE (jours)		
	2j	7j	28j
Compression	23,7	35,8	44.9
Flexion	5.1	6.8	7.9

Tableau 15 : Composition chimique et minéralogique du ciment : selon NF EN 196-2

Eléments	%
CaO	62.78
SiO₂	18.88
Al₂O₃	4.65
Fe₂O₃	3.20
SO₃	2.41
Na₂O	0.10
K₂O	0.64
MgO	2.42
CaO₁	0.949
PAF	4.60
Insolubles	1.21

minéraux	%
C₂S	21
C₃S	55
C₃A	8
C₄AF	10
CaO.L	01

c) Eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet sans passer par l'analyse chimique.

3. LES FINES :

Tableau 16. Composition chimique de filler de calcaire :

Eléments	%
CaO	51.67
SiO ₂	3.70
Al ₂ O ₃	1.40
Fe ₂ O ₃	0.51
SO ₃	0.14
Na ₂ O	0.12
K ₂ O	0.16
MgO	0.67
P ₂ O ₅	0.03
TiO ₂	0.07
PF	41.53

1. La SSB des fines est de 3500 **cm² / g**

4. LES ADJUVANTS : on a utilisé un superplastifiant :

➤ **MEDAFLOW 30** Superplastifiant – Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2 (d'après GRANITEX, c'est un adjuvant à base de polycarboxylate)

➤ **Description :**

Le MEDAFLOW 30 est un Superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylate qui améliore considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de

sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

Caractéristiques :

- Forme Liquide
- Couleur Jaunâtre
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$

Propriétés et effets :

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Domaines d'application :

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

Dosage :

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Mode d'emploi :

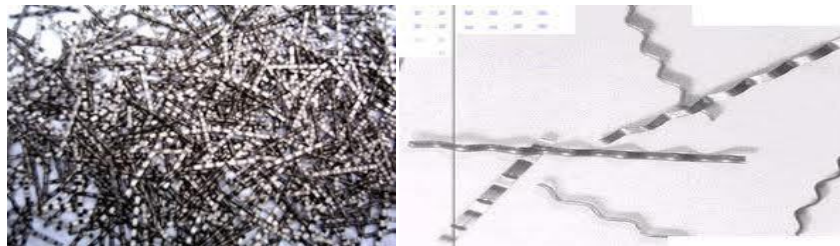
Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

5.LES FIBRES :

Nous avons utilisés deux types de fibres : métalliques et de verre avec les caractéristiques suivantes :

Fibres métalliques :**Tableau 17 : caractéristiques dimensionnelles des fibres métalliques**

Les caractéristiques	Les valeurs
Longueur	60 mm
Largeur	2 mm
densité	1.05

**Fig 58 fibres métalliques****Fibres de verre :****Tableau 18 : caractéristiques mécaniques de la fibre de verre**

CARACTERISATION	RESULTATS	UNITE
Contrainte à la traction	217.76	MPa
Module d'élasticité en traction	12867.4	MPa
Allongement a la rupture	2.91	%

Tableau 19 : Caractéristiques chimiques de la fibre de verre

constituants	teneurs	unité
SiO₂	53-54	%
Al₂O₃	14-15.5	%
CaO	20-24	%
MgO		
B₂O₃	6.5-9	%
Fluor	0-0.7	%
Fe₂O₃	<1	%
TiO₂		
Na₂O	<1	%
K₂O		

Conclusion de la première partie :

Suivant les résultats obtenus, après caractérisation des différents constituants à savoir (sable, graviers, ciment, fillers), nous tirons qu'on peut utiliser ces derniers dans les bétons en général et les BAP en particulier.

Chaleur d'hydratation :

a) But de l'essai : NF P 15 – 436

La présente norme a pour but de spécifier la méthode de mesure de la chaleur d'hydratation des ciments par calorimétrie semi – adiabatique, dite méthode du calorimètre de Lanvagan. L'essai consiste à la mesure continue de la chaleur d'hydratation des ciments au cours des premiers jours. La quantité de chaleur s'exprime en joule par gramme.

b) Description de l'appareil :



Photo 59 : Calorimètre de Lanvagan

➤ Calorimètre :

Le calorimètre est constitué d'un vase de Dewar fermé par un bouchon calorifugé et placé dans une enveloppe rigide qui lui sert de support.



➤ Boîte à mortier :

Récipient cylindrique muni d'un couvercle, d'une capacité de 800 cm³, destiné à recevoir la gâchée de mortier afin de constituer une éprouvette.



- **Instrument de mesure de la température :**

L'échauffement de l'éprouvette est mesuré avec un thermomètre à mercure, ou un thermocouple ou encore une sonde à résistance électrique.

c) L'essai effectué :

On a mesuré la chaleur d'hydratation pour deux échantillons dont la composition de ces derniers change :

La première composition : ciment seul + sable normalisé + l'eau distillée

La deuxième composition : ciment + sable normalisé + l'eau distillée + superplastifiant

Afin de voir l'influence de superplastifiant sur la chaleur d'hydratation

Les résultats sont figurés dans les tableaux ci après :

Tableau N°20 : chaleur d'hydratation du (Ciment+sable normalisé +eau) :

Age (h)	12h	24h	41h	48h	72h	120h
Echauffement (C°)	15.50	23.90	19.50	17.20	9.70	2.80
Chaleur (j/g)	105.32	211.57	260.63	272.28	288.71	296.99

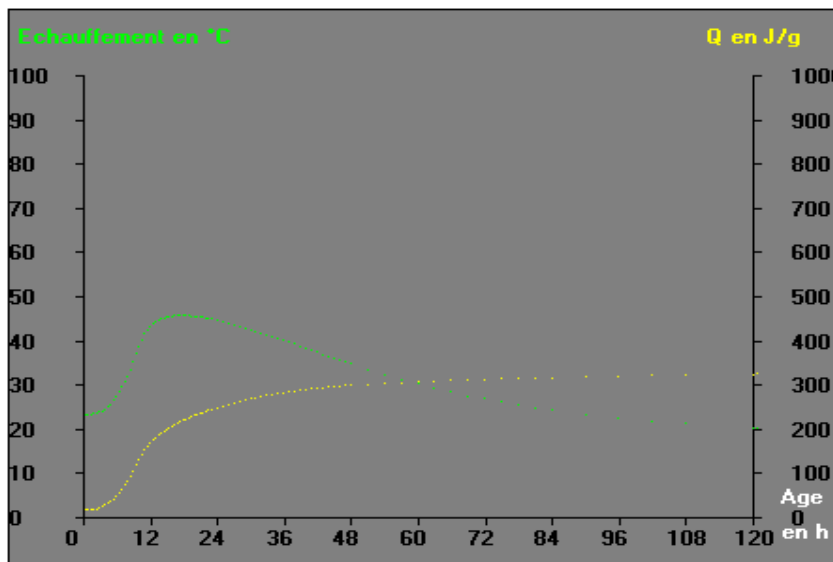


Fig 60: La variation de la chaleur d'hydratation du ciment en fonction de temps

On constate une élévation de la température jusqu'à 48 heures, qui est due à l'hydratation du C3A qui est une réaction fortement exothermique.

Le C3A développe les résistances mécaniques à 2 jours.

Tableau 21 : chaleur d'hydratation du (ciment+sable normalisé+superplastifiant+ eau) :

Age (h)	12	24	41	48	72	120
Echauffement (C°)	3.20	22.30	21.80	19.10	9.80	2.50
Chaleur (j/g)	18.52	157.63	236.69	250.24	264.13	243.91

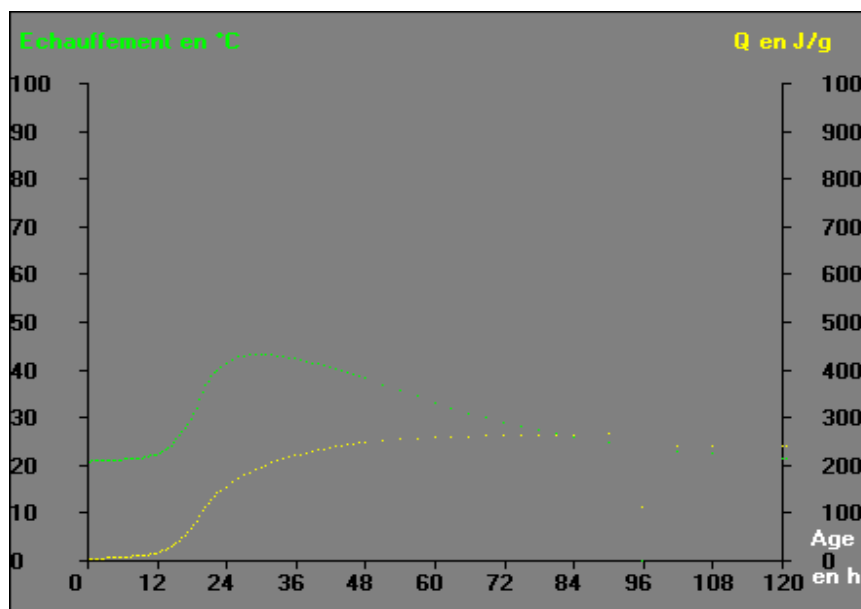


Figure61 : La variation de la chaleur d'hydratation du ciment +superplastifiant en fonction de temps

On constate que la présence du superplastifiant atténue le dégagement de chaleur aux premières heures de l'hydratation, ce qui est due à l'adsorption d'une partie du superplastifiant sur les particules de ciment où nous avons un retard de précipitation des hydrates en présence de superplastifiants par rapport au mélange sans superplastifiant.

2. LA DEUXIEME PARTIE :

2.1. La rhéologie des pâtes de ciment :

Caractérisation rhéologique de la matrice cimentaire et détermination du point de saturation en superplastifiant (polycarboxylates haut réducteur d'eau), par un viscosimètre et faire la liaison avec la pate utilisée dans le BAP.

a) But de l'essai :

Cet essai consiste à voir l'influence de polycarboxylates (MEDAFLOW 30) sur le comportement rhéologique de la pate de ciment

L'appareil que nous avons utilisé est un viscosimètre VT550 à la géométrie SV DIN

Cet appareil permet de mesurer la viscosité apparente et plastique du coulis ainsi que le taux de cisaillement.

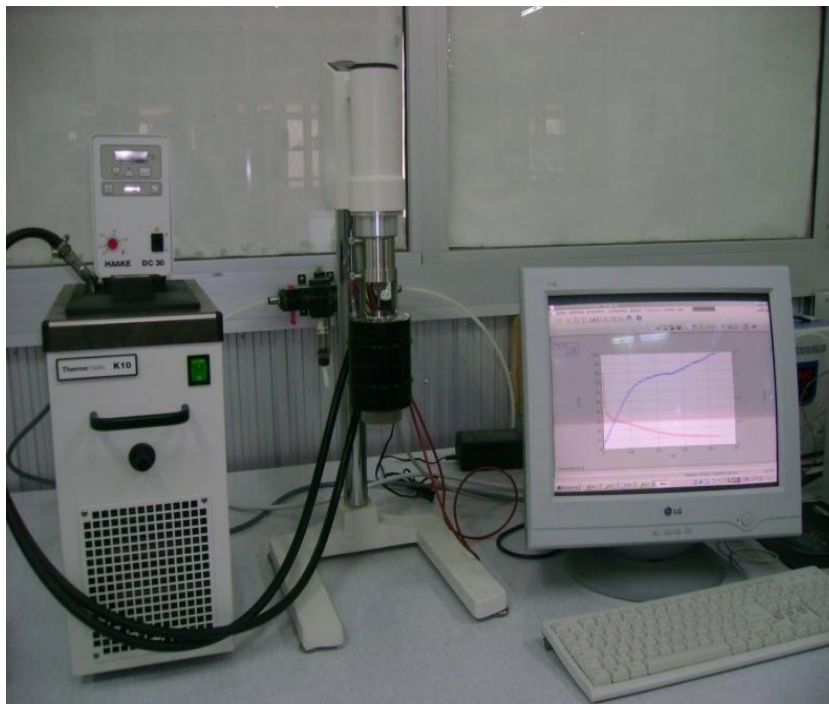


Figure 62 : Viscotester VT550

b) Description de l'appareil:

Le Viscotester VT550 est un matériel de laboratoire, il est destiné à un personnel qualifié, ayant appris à s'en servir

Un viscosimètre, est un appareil destiné à analyser les caractéristiques rhéologiques (physiques) de substances liquides à semi- solides. L'utilisation devra tenir compte des Propriétés chimiques, écologiques et physiologique de ces substances

Un appareillage électrique mobile, qu'il convient de tenir compte des conditions particulières régnant à l'endroit où il est installé. On veillera en particulier à ne jamais utiliser l'appareil en atmosphère explosive.

L'équipement complet prêt à être utilisé se compose des éléments suivants :

- 1.** Viscotester **VT550** et bloc d'alimentation, manchon thermostatique et dispositif de mesure, sonde thermique Pt100 support.
- 2.** Viscotester **VT550** et bloc d'alimentation, manchon thermostatique et dispositif de mesure, sonde thermique Pt100 corps plongeant, support.
- 3.** Viscotester **VT550** et bloc d'alimentation, dispositif de mesure PK100 avec cône.

c) Etude rhéologique de la pate de ciment + superplastifiant + filler de calcaire

Premièrement nous avons déterminé le point de saturation en polycarboxylates pour (ciment+ filler de calcaire)

Le protocole de formulation de la pate de ciment consiste à fixer la quantité d'eau et varier la quantité de polycarboxylates dans le mélange.

Les résultats obtenus par le viscosimètre sont présentés dans les graphes ci-après :

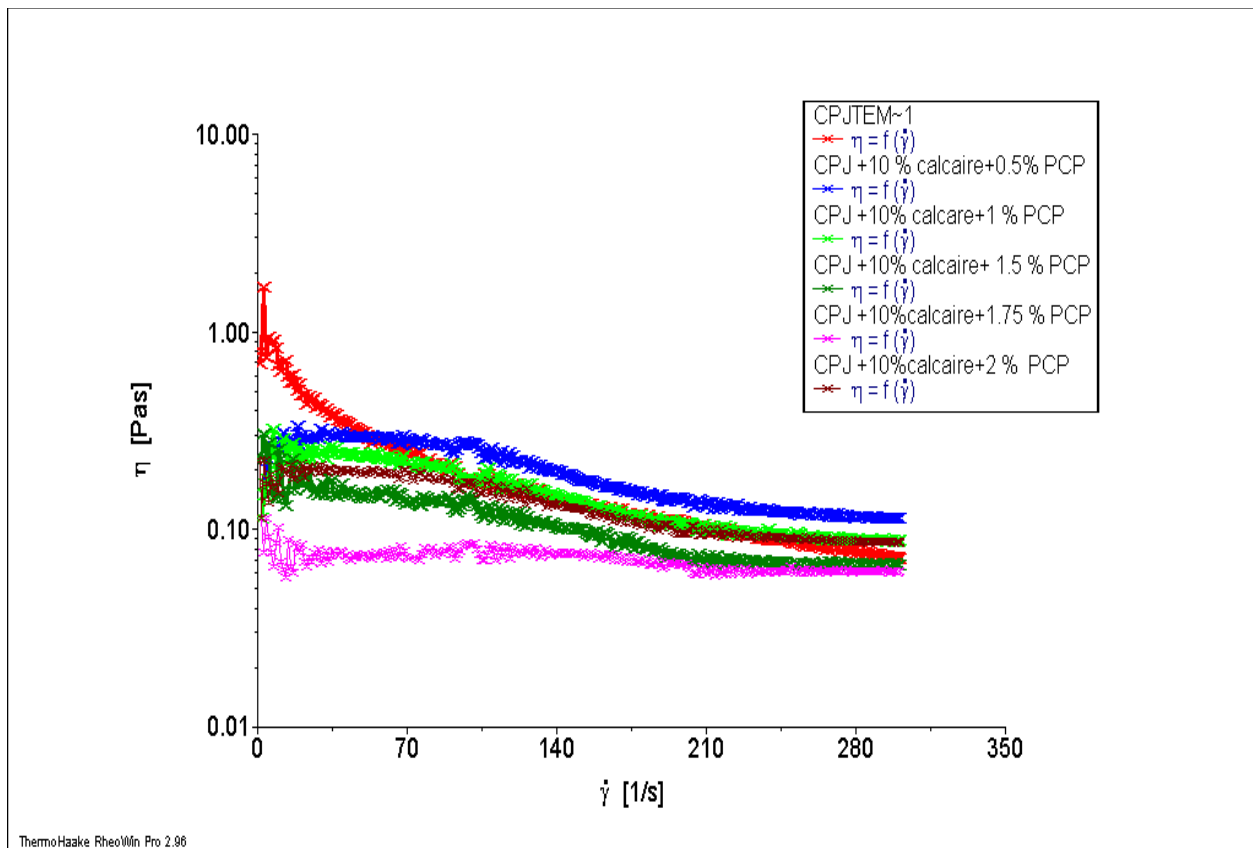


Fig. 63: la variation de la viscosité en fonction de la vitesse de cisaillement

On remarque que plus le pourcentage de superplastifiant augmente plus la viscosité diminue jusqu'au point de saturation où le superplastifiant n'a aucun effet sur la viscosité.

D'après le graphe la viscosité de la pâte (C+F+Sp) commence à se stabiliser à partir d'un dosage de (1.75 %). Cette performance rhéologique est obtenue grâce à la longueur de la chaîne principale ainsi que son greffage par des chaînes latérales non absorbantes et qui se prolongent dans la solution lorsque le polymère s'adsorbe (polycarboxylates).

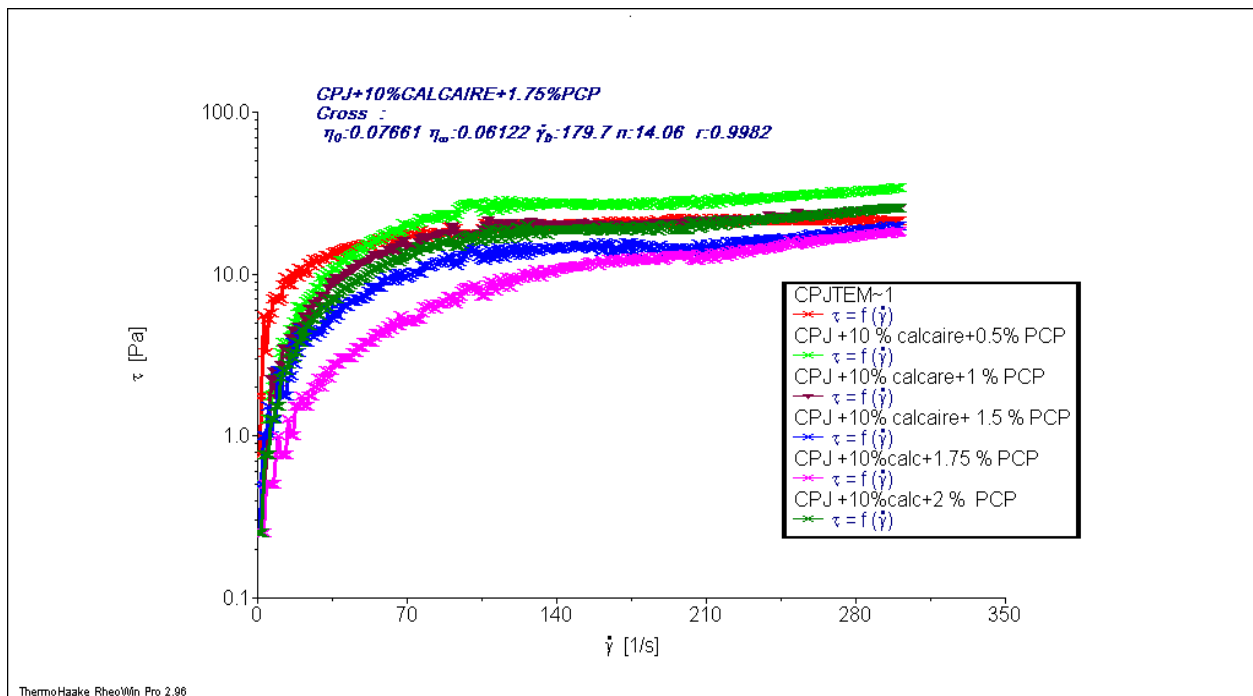
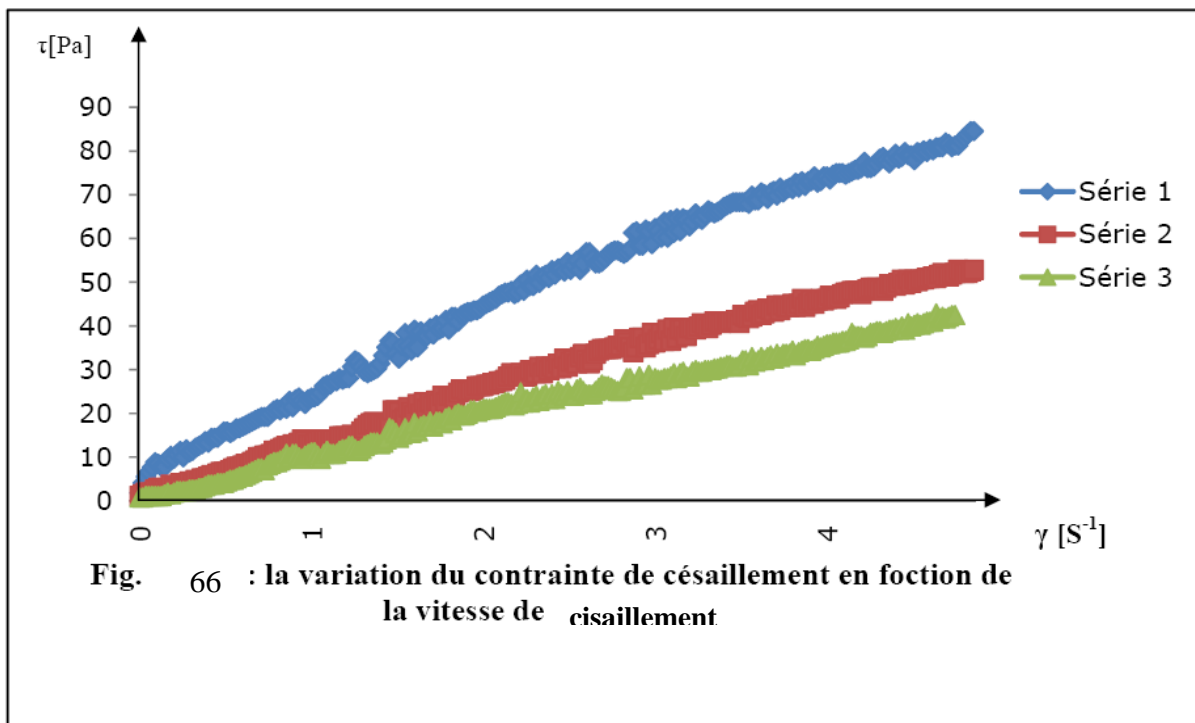
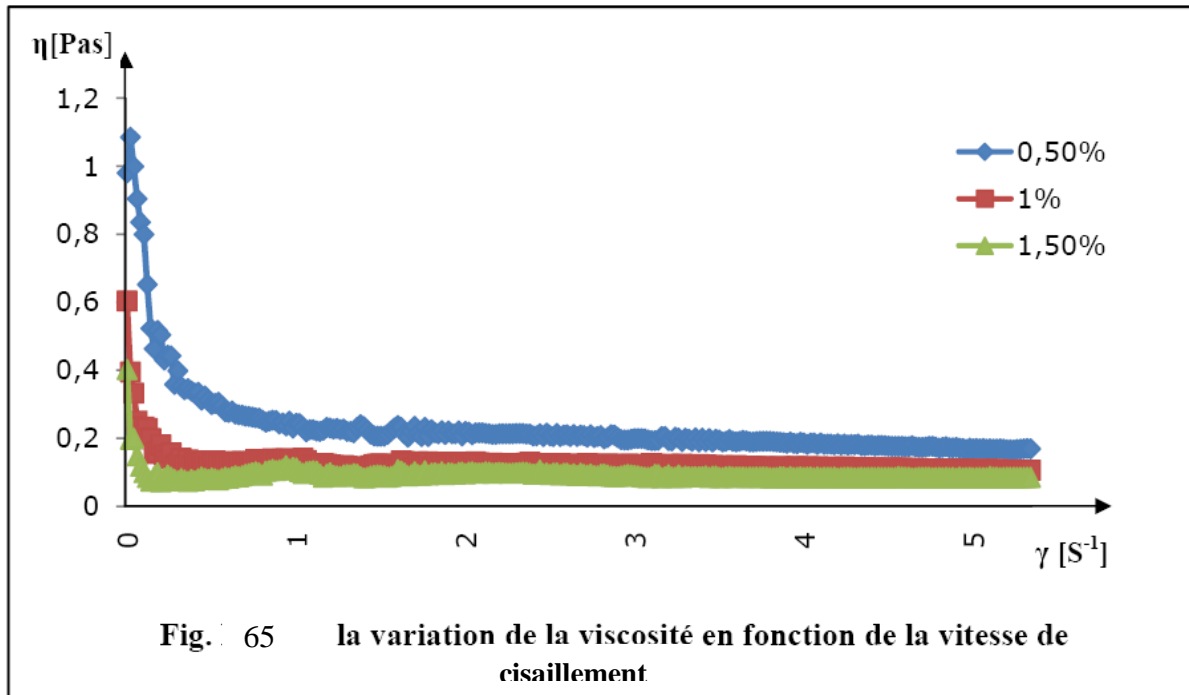


Fig. 64: la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement

D'après cette figure nous avons une augmentation de l'écoulement de la pate en fonction d'augmentation de pourcentage de superplastifiant et ça due à l'effet défloculant de polycarboxylates qui enrobent les grains de ciment et les éloignent les uns aux autres

d) Etude rhéologique de pate de ciment + superplastifiant :



Ces courbes ont la même forme que ce soit pour la viscosité ou pour la contrainte de cisaillement

Dans le premier échantillon la teneur en fine est supérieure par rapport au deuxième échantillon à cause de la présence de filler de calcaire qui est connu par sa finesse élevée, ce qui explique la différence dans le point de saturation.

3. LA TROISIEME PARTIE :

Formulation d'un BAP par la méthode LGC proposée par Shen Jie en 2009 :

Cette méthode de formulation est basée sur l'empilement des granulats et de la fluidité de la pâte. Elle est relativement simple et elle nécessite seulement deux types d'essais : la mesure de la masse volumique pour les granulats et l'essai d'étalement au cône pour la pâte.

Elle n'exige donc pas beaucoup d'appareils expérimentaux et peut être considérée relativement simple à appliquer. Avec ces deux expériences, les paramètres nécessaires pour la formulation des BAP peuvent être clairement déterminés.

Les principales étapes de la méthode de formulation proposée pour les BAP sont :

- Optimiser la compacité des granulats par l'intermédiaire de paking-factor (PF) et de rapport du sable sur gravier
- Déterminer la composition de la pâte à l'aide de la formule de bolomy.
- Assurer une fluidité comparable pour chaque type de pâte (pâte de ciment et pâte de fillers calcaire) sous l'influence de superplastifiant.
- Déterminer le dosage en superplastifiant à l'aide de l'essai d'écoulement sur mortier.

Optimisation du squelette granulaire :

Essai de compactage :

L'essai de compactage se fait par deux procédures :

➤ **Procédure 1**

- ✓ remplir le récipient (10 litre de volume) jusqu'au débordement à l'aide d'une pelle ou d'une écope, il convient que la hauteur de chargement n'excède pas 50 mm au dessus de récipient. prendre le soin d'empêcher la ségrégation des particules.
- ✓ Araser la surface des granulats avec une règle droite de telle manière que toutes les légères projections des grains équilibrent approximativement les vides parmi les grains au niveau de la surface de récipient.
- ✓ Peser le récipient et son contenu, et enregistrer les valeurs à 0.05 kg près.

Procédure 2 :

- ✓ Remplir le récipient en 3 couches sensiblement égales.
- ✓ Chaque couche doit être nivelée et compactée avec 25 coups de tige métallique.

Lors du piquage de la première couche, ne laisser pas la tige frapper fortement le fond du récipient.

Lors du piquage de la deuxième et troisième couche, employer l'effort vigoureux sans faire pénétrer la tige a la couche précédente :

- ✓ Araser la surface du récipient de la même façon que la procédure 1
- ✓ Peser le récipient et son contenu.

Le rapport massique de sable/granulats est varié de 0% jusqu'a 100% Sur chaque point expérimental,

La masse volumique des granulats avant et après compactage sont mesurées selon les deux procédures précédemment citées.

Les graviers utilisés sont de classe granulaire de 3/8 et 8/15 avec des proportions égaux (50% de 3/8 et 50% de 8/15). Les résultats d'essai de compactage sont donnés par le tableau suivant :

Tableau22 : Densité avant et après compactage des granulats :

% SABLE	% GRAVIER	S avant (kg /m ³)	S après (kg /m ³)
100	0	1400	1756
80	20	1557	1911
60	40	1643	1983
50	50	1734	1989
45	55	1677	1977
40	60	1672	1973
20	80	1582	1767
0	100	1360	1548

Ces résultats nous permettent de tracer la courbe de compactage suivante :

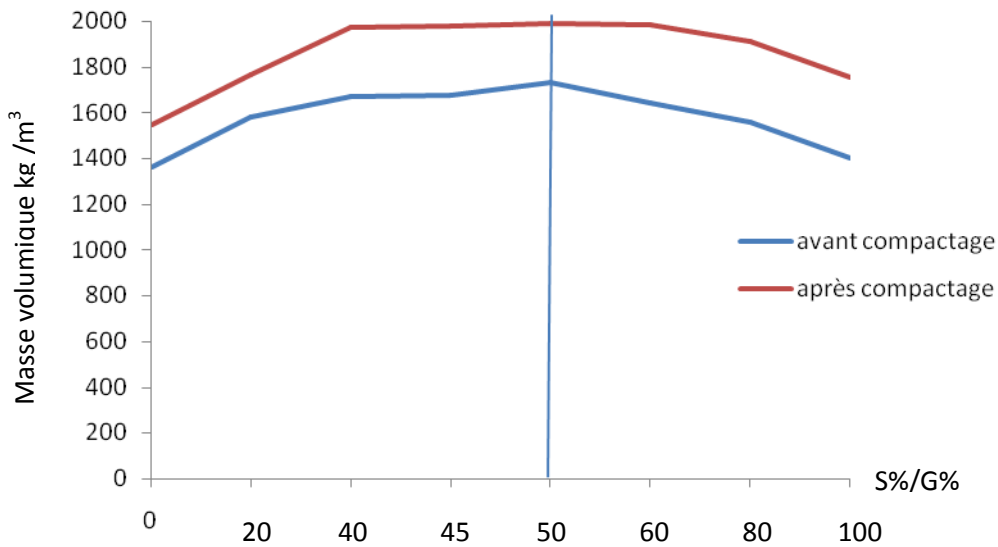


Fig 67 : Diagramme D'essai De Compactage Selon ASTM C29/C29m

Les deux courbes obtenues représentent mieux les données expérimentales. Les points indiqués par le trait représentent les sommets de la courbe de régression est [50 ; 50] et le rapport optimal sable/granulats est égale a la valeur où la compacité est maximale qui est dans notre cas égale a

$$R_s / g = 50/50 = 1$$

-CALCUL DE LA COMPOSITION DU BAP :

Les données de base pour la composition :

1- La résistance envisagée du BAP à 28 jours est de 50 MPa

2- L'étalement visé :

✓ Pour béton égale a 700 ±50 mm

✓ Pour la pate égale a 34±2 mm

3- type de ciment : CPJ-42.5 de masse spécifique 3100 Kg/m³ et de f_{ce} 28 = 44.1MPa

4-les fines utilisés sont des fillers calcaire de masse spécifique 2620Kg/m³

5- les masses volumiques avant et après compactage des graviers sont respectivement 1360Kg/m³ et 1548 Kg/m³

Et la masse spécifique de ces graviers est de 2830 Kg/m³

6-les masses volumiques avant est après compactage de sable sont respectivement 1400 Kg/m³ Et 1756 Kg/m³, et la masse spécifique de sable est de 2730 Kg/m³

7-la masse volumique des granulats à L'optimum est 1734 Kg/m³ avant compactage et de 1989 Kg/m³ après compactage et de masse spécifique de 2750 Kg/m³

CALCUL DES CONSTITUANTS D'UN BAP PAR LA METHODE LGC :

En utilisant les formules citées a la partie théorique, le calcul se déroule comme suit :

Les granulats :

- En utilisant la formule (1) on a $PF = 1.14$
- le volume du sable et du gravier en utilisant la formule (2) et (3) :
on trouve $V_g=0.51 \text{ m}^3$ et $V_s= 0.49 \text{ m}^3$
- la masse du sable et du gravier :

$$S_1 = V_s * M_{Vs} = 686 \text{ Kg/m}^3$$

$$G_1 = V_g * M_{Vg} = 693. \text{ Kg/m}^3$$

- la masse total des granulats (M_a) est calculés selon (4) $M_a = 1792.8 \text{ Kg/m}^3$
- le volume total des granulats (V_a) :

$$V_a = M_a / S_a = 1792.8 / 2750 = 0.652 \text{ m}^3$$

- le volume de la pate :
- $1 - V_a = 1 - 0.652 = 0.3480$

Supposant le volume d'air est de 0.015 m^3

$$V_p = 0.333 \text{ m}^3$$

La pate :

- Le volume de la pate (V_p) est calculé selon (5) : $V_p = 0.333 \text{ m}^3$
- La quantité de liant utilisé est donné par la formule $L = C + K * A$

L'indice d'activité de l'ajout (dans notre cas des fillers calcaires on a $k=0$)

Donc la quantité de liant est égale a la quantité du ciment.

- La quantité d'eau nécessaire pour ce liant est calculée par la formule de Bolomy (6)
Avec G est un coefficient lié aux propriétés des granulats (dans notre cas $G=0.57$)
D' où $L/E = 0.40$

- Calcul de la quantité de ciment et de fillers calcaire :

On adapte que le volume d'air dans le béton est égale 0.015 m^3

- la quantité du ciment est calculée selon (13) on trouve $C = 425.5 \text{ kg/ m}^3$
- la quantité du fillers calcaire : $F = M_c$, d'une manière générale :
- ✓ $m = 0.11$ pour $F/(F+C) = 10\%$
- ✓ $m = 0.18$ pour $F/(F+C) = 15\%$
- ✓ $m = 0.25$ pour $F/(F+C) = 20\%$

Dans notre cas on a $F/(F+C) = 10\% = 0.1$ d' où $F = 47 \text{ kg/m}^3$

- La quantité d'eau calculée selon la formule (16) : $E = 0.178 \text{ Kg/m}^3$

- Le dosage en superplastifiant : pour atteindre l'étalement visé sur les pates (ciment, fillers),

On a utilisé 0.33% de superplastifiant en masse

La quantité de superplastifiant est calculée par la formule suivante $SP = n \cdot (C + F + S + G)$

D'où $SP = 7.4 \text{ kg/m}^3$

Le pourcentage de l'adjuvant est calculé comme suit : $SP\% = SP \cdot (C + F) / 100 = 1.6\%$

- La correction du dosage en eau :

L'extrait sec de l'adjuvant à base de polycarboxylates (MEDAFLOW 30) est 30%

Donc la quantité d'eau corrigée $E = E - (0.7 \cdot SP)$

$$E = 178 - (0.7 \cdot 7.4) = 173 \text{ l/m}^3$$

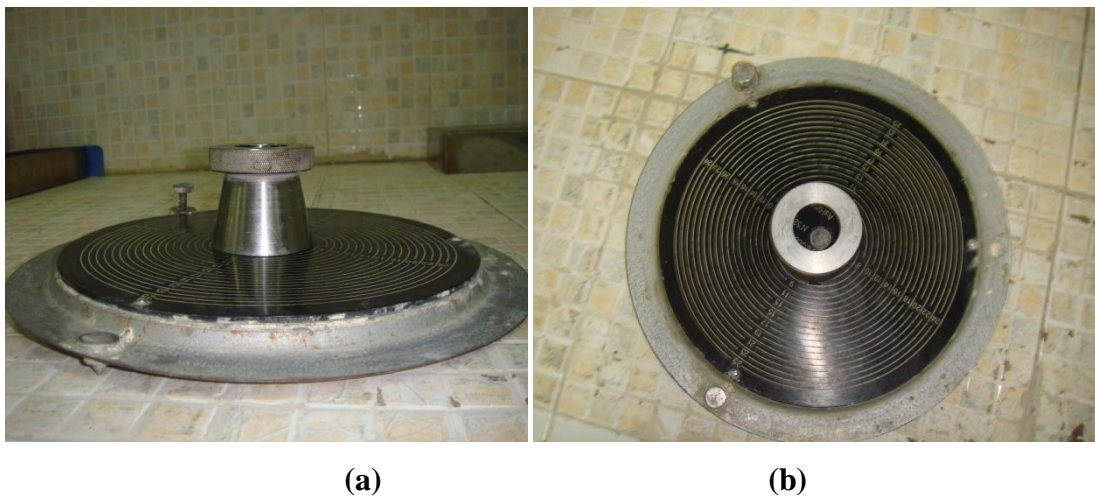


Fig 68.1 Mini cône pour l'essai d'étalement de la pate

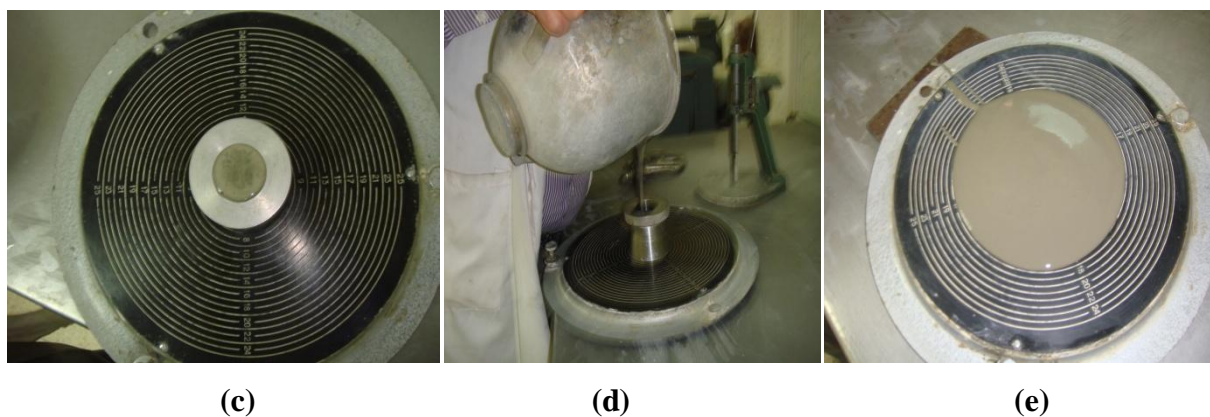


Fig 68.2 Essai d'étalement de la pate

La composition pour 1 m^3 du BAP par la méthode LGC est récapitulée dans le tableau suivant :

Tableau 23 : composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode LGC

Constituants		Quantité	Unité
ciment		425.5	Kg/m ³
Fillers calcaire		47	Kg/m ³
graviers	classe 3/8	395.08	Kg/m
	classe 8/15	395.08	Kg/m ³
Sable corrigé		782.5	Kg/m ³
Eau		173	l/m ³
Superplastifiant		7.4	Kg/m ³

Le tableau suivant présent les caractéristique rhéologiques du béton après malaxage :

Tableau24 : caractéristiques rhéologiques du BAP

Essais	Résultats	unités
Etalement au cone d'abrams	700	mm
Stabilité au tamis	8.8	%
Boite en L (H ₂ /H ₁)	0.89	/



(a)



(b)



(c)

Fig 69 : Essai d'étalement et stabilité au tamis

D'après les résultats obtenus, le béton autoplaçant (BAP) présente d'excellentes propriétés rhéologiques dont elles sont conformes aux exigences prescrites par l'AFGC

Ces excellentes propriétés sont dues à la facilité de superplastifiant à défloculer et disperser les grains du ciment qui sont directement liés à l'adsorption de polycarboxylates à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats. ce mécanisme d'action est dû à sa composition chimique qui est constituée des chaînes latérales greffées en plus des chaînes principales longues (masse molaire élevée)

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

Tableau 25 : Caractéristiques mécaniques de BAP

Résistance à la compression		
Age(jours)	07	28
Rc(MPa)	29.82	48.4
Résistance à la flexion		
Age (jours)	07	28
Rf(MPa)	7.39	8.29

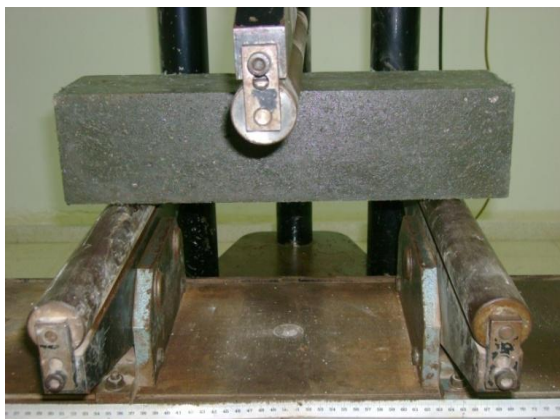


Fig 70 : Essai de flexion à 3 points



Fig71:Essai de compression

Formulation d'un BAP fibré par la méthode LGC :

Pour la composition de ce type de béton nous avons réalisé la même composition que celle de béton autoplacant précédent mais avec l'incorporation des fibres.

Nous avons incorporé deux types de fibres (métalliques et de verre) avec deux dimensions différentes (longue et courte pour chaque une) avec une pourcentage fixe des fibres (1.75% des fibres métalliques et 0.25% des fibres de verre) afin de trouver les propriétés rhéologiques souhaités.

Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes:

BAP⇒ béton autoplacant sans fibres

BAP +FML⇒béton autoplacant avec l'ajout des fibres métalliques longues.

BAP+FMC⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres métalliques courtes

BAP+FVL⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres de verre longues

BAP+FVC⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres de verre courtes

BAP+FMC+FVC⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres métalliques courtes et des fibres de verre courtes

BAP+FML+FVL⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres métalliques longues et des fibres de verre longue

BAP+FVC+FML⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres de verre courtes et des fibres métalliques longues.

BAP+FVL+FMC⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres de verre longue set des fibres métalliques courtes

BAP+FVC+FVL⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres de verre courtes et des fibres de verre longue

BAP+FMC+FML⇒ béton autoplacant avec l'ajout des fibres métalliques courtes plus des fibres métalliques longues.

I-INFLUENCE DE LA LONGUEUR DES FIBRES :

Tableau 26 : caractéristiques rhéologiques des bétons autoplacants fibré (fibres métalliques longues et courtes) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Étalement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boîte en L
BAP	700	8.8	0.89
BAP +FML	700	8.8	0.87
BAP+FMC	700	8.8	0.87

REMARQUE :

Le tableau ci-dessus présente les caractéristiques rhéologiques d'un BAP témoin et un autre fibré par des fibres métalliques courtes et longues avec un pourcentage de 1.75% de la quantité des fines où nous avons trouvé des meilleurs résultats.

Donc on conclure que les dimensions des fibres métalliques n'influent pas sur les propriétés rhéologiques du BAP et on peut obtenir un très bon étalement avec une meilleure stabilité au tamis.

Tableau 27 : caractéristiques mécaniques des bétons autoplacants fibrés (fibres métalliques longues et courtes) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES			
	Résistance à la compression		Résistance à la flexion	
	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP	29.82	48.4	7.39	8.29
BAP +FML	30.5	48.8	7.62	8.36
BAP+FMC	30.80	49	7.9	8.48

REMARQUE :

D'après les résultats inscrites dans le tableau ci-dessus on trouve une légère amélioration de résistance à la compression de l'ordre de 0.82% dans la formulation contient des fibres métalliques longues, et de 1.23% pour celle qui contient des fibres courtes.

Concernant la résistance à la flexion il ya une légère augmentation de résistance de l'ordre de 0.85% pour la formulation qui contient des fibres métalliques longues, et de 2.29% pour celle qui contient des fibres courtes.

Donc les dimensions des fibres jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants.

28: caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibres de verre longues et courtes) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Etallement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L
BAP	700	8.8	0.89
BAP+FVL	680	6.9	0.80
BAP+FVC	680	6.9	0.80

REMARQUE :

Comme la fluidité et la facilité de mise en œuvre de béton autoplaçant jouent un rôle essentiel dans ses propriétés, nous avons incorporé un % de 0.25% des fibres de verre par rapport la quantité des fines. Où au delà de ce pourcentage le béton perd ses propriétés rhéologiques.

Et avec cette quantité nous avons obtenus une légère diminution dans les propriétés rhéologique comme c'est inscrit dans le tableau mais nous restons toujours dans l'intervalle des bétons fluides.

Donc on peut conclure que la nature des fibres joue un rôle et elle a une influence sur l'aspect rhéologique des bétons autoplaçant ; contrairement a la longueur qui ne pose pas de problème

Tableau 29 : caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibres de verre longues et courtes) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES			
	Résistance a la compression		Résistance a la flexion	
	7 jours (MPa)	28jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP	29.82	48.4	7.39	8.29
BAP+FVL	29.30	48.1	7.43	8.30
BAP+FVC	29.37	48.23	7.49	8.33



Figure 72 : Eprouvette après fissuration par flexion

REMARQUE :

D'après les résultats obtenus nous avons une diminution de la résistance à la compression qui présente 0.61% dans le cas des fibres longues et de 0.35% pour les fibres courtes.

Concernant la résistance à la flexion nous avons remarqué une amélioration de résistance de l'ordre de 0.12% pour le béton qui contient des fibres longues et de 0.48% pour le béton fibré par les fibres courtes.

Donc on conclure que la longueur des fibres de verre influe sur les propriétés mécaniques du béton durci.

Tableau 30 : caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés (fibrage mixte longues et courtes) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Etallement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boîte en L
BAP	700	8.8	0.89
BAP+FMC+FVC	680	6.9	0.80
BAP+FML+FVL	680	6.9	0.80

REMARQUE :

D'après les résultats inscrits dans le tableau 30 nous tirons qu'on peut garder les propriétés rhéologiques d'un béton autoplaçant avec l'utilisation d'un fibrage mixte avec des différentes dimensions.

Dans le cas de l'étalement nous avons une diminution de 20mm par rapport le béton de référence mais le résultat est toujours entre 650mm et 750mm

Concernant la stabilité au tamis l'utilisation des fibres influe positivement sur cette dernière.

Tableau 31: caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants fibrés (fibrage mixte longues et courtes)

TYPE BETON	DE	CARACTERISTIQUES			
		Résistance a la compression		Résistance a la flexion	
		7 jours (MPa)	28jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP		29.82	48.4	7.39	8.29
BAP+FMC+FVC		30.68	48.88	8.02	8.52
BAP+FML+FVL		30.43	48.7	7.65	8.44

REMARQUE :

Nous remarquons d'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus que l'utilisation d'un fibrage mixte (fibre métalliques+fibrés de verre) améliore les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant ou nous avons trouvé dans le cas de l'utilisation des fibres longues une différence de 0.62% pour la résistance a la compression et une valeur de 1.81% pour la résistance a la flexion.

Et dans le cas des fibres courtes l'augmentation de la résistance à la compression est de 1% et la résistance a la flexion est de 2.75% par rapport au béton témoin.

Ca implique que les fibres courtes donnent des meilleurs résultats par rapport aux fibres longues

II-INFLUENCE DE LE NATURE DES FIBRES :

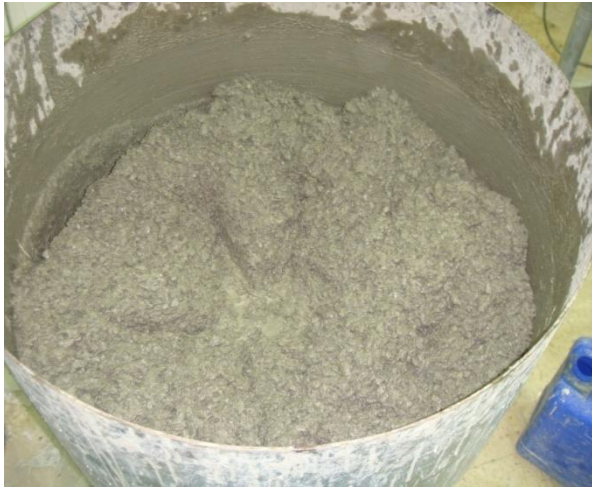
Tableau 32 : caractéristiques rhéologiques des bétons autoplacants fibrés (hybridation)

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Étalement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L
BAP	700	8.8	0.89
BAP+FML	700	8.8	0.87
BAP+FVL	680	6.9	0.80
BAP+FMC	700	8.8	0.87
BAP+FVC	680	6.9	0.80
BAP+FMC+FML	700	8.8	0.87
BAP+FVC+FVL	680	6.9	0.80

Concernant l'influence de la nature des fibres sur la rhéologie des BAP et pour obtenir un béton autoplacant nous avons pris deux pourcentages différents des fibres (0.25% de fibres de verre et 1.75% des fibres métalliques. Afin de garder les propriétés rhéologiques requises.

Et d'après les résultats obtenus nous tirons que le BAP peut garder ses propriétés rhéologiques avec l'ajout des fibres (soit des fibres de verre ou des fibres métalliques sauf qu'il ya une légère différence au niveau d'étalement de 20mm ; et de 1.9% au niveau de la stabilité

Donc on peut conclure que les fibres métalliques donnent un meilleur étalement au béton autoplacant ; et avec les fibres de verre on obtient une meilleure stabilité.



BAP+1.75% fibre de verre



BAP+0.25% fibre de verre



BAP+1.75% fibre de verre



BAP+0.25% fibre de verre



BAP+1.75% fibre de verre



BAP+0.25% fibre de verre

Figure 73 : Etat rhéologiques d'un béton autoplaçant fibré par les fibres de verre

Tableau 33 : caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants bi fibrés

TYPE BETON	CARACTERISTIQUES			
	Résistance a la compression		Résistance a la flexion	
	7 jours (MPa)	28jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP	29.82	48.4	7.39	8.29
BAP+FML	30.5	48.8	7.62	8.36
BAP+FVL	29.30	48.1	7.43	8.30
BAP+FMC	30.80	49	7.9	8.48
BAP+FVC	29.37	48.23	7.49	8.33
BAP+FMC+FML	31.2	49.3	8.45	9.07
BAP+FVC+FVL	29.36	48.2	7.5	8.34

L'ajout des fibres au béton autoplaçant influe sur sa résistance soit à la compression ou à la flexion.

la résistance a la compression :

D'après les résultats inscrits dans le tableau ci-dessus on remarque que l'ajout des fibres de verre diminue la résistance de 0.62% pour les fibres longues et de 0.35% pour les fibres courtes et de 0.4% dans le cas d'hybridation.

Par contre avec l'ajout des fibres métalliques nous remarquons qu'on a un accroissement de résistance de 0.82% pour les fibres longues et de 1.24% pour les fibres courtes et jusqu'à 1.86% dans le cas d'hybridation.

la résistance a la flexion :

L'ajout de fibres au béton influe positivement sur sa résistance à la flexion où nous remarquons d'après les résultats obtenus que les fibres de verre améliorent la résistance de 0.12% pour les fibres longues et de 0.48% pour les fibres courtes et de 0.6% dans le cas d'hybridation

Les fibres métalliques améliorent la résistance avec un pourcentage de 0.84% pour les fibres longues, et de 2.29% pour les fibres courtes et jusqu'à 9.40% dans le cas de l'hybridation.

III-INFLUENCE DE L'HYBRIDATION (LANGUEUR –NATURE) :

Tableau 34 : caractéristiques rhéologiques des bétons autoplacants fibrés (hybridation) :

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES		
	Etallement (mm)	Stabilité au tamis (%)	Boite en L
BAP	700	8.8	0.89
BAP+FVC+FML	680	6.9	0.80
BAP+FVL+FMC	680	6.9	0.80
BAP+FVC+FVL	680	6.9	0.80
BAP+FMC+FML	700	8.8	0.87
BAP+FMC+FVC	700	8.8	0.87
BAP+FML+FVL	680	6.9	0.80

Et pour compléter notre étude nous avons utilisé un fibrage mixte (deux types de fibres) avec deux différentes longueurs (courtes et longues).

Et d'après les résultats obtenus en remarque qu'on peut garder les propriétés rhéologiques d'un béton autoplacant même avec l'ajout des fibres

En remarque d'après les résultats inscrits dans le tableau que la combinaison des fibres améliore la stabilité du béton frais

Tableau 35 : caractéristiques mécaniques des bétons autoplacants bi fibrés (hybridation):

TYPE DE BETON	CARACTERISTIQUES			
	Résistance a la compression		Résistance a la flexion	
	7 jours (MPa)	28jours (MPa)	7 jours (MPa)	28 jours (MPa)
BAP	29.82	48.4	7.39	8.29
BAP+FVC+FML	30.40	48.77	7.7	8.42
BAP+FVL+FMC	30.62	48.85	7.86	8.54
BAP+FVC+FVL	29.36	48.2	7.5	8.34
BAP+FMC+FML	31.2	49.3	8.45	9.07
BAP+FMC+FVC	30.68	48.88	8.02	8.52
BAP+FML+FVL	30.43	48.7	7.65	8.44

REMARQUE :

D'après les résultats représentés dans le tableau 35 en remarque que l'ajout des fibres influe sur ses propriétés mécaniques.

1-dans le cas de la résistance a la compression :

En remarque qu'il ya pas une variation remarquable avec l'ajout des fibres ; où nous avons une légère diminution de résistance de l'ordre de 0.41% pour le béton contient que les fibres de verre avec les deux dimensions.

Par contre pour les bétons bi-fibrés par les deux types de fibres métalliques et verre on a une différence de résistance de 0.76% et 0.93%

Mais dans le cas de fibres métalliques courtes et longues nous observons une différence de l'ordre de 1.86%

-mais comme la résistance a la compression ne pose pas de problème pour le béton une légère diminution na pas une grande 'influence.

2-Dans le cas de la résistance a la flexion :

Comme la résistance de béton à la flexion pose un grand problème, les chercheurs essaient de trouver une solution par l'introduction des fibres dans le béton.

Les résultats obtenus nous montrent que la substitution des fibres influe positivement sur la résistance du béton mais pas d'une manière remarquable de l'ordre de 0.6% dans le cas des fibres de verre(courtes et longues) et de 1.57% pour le béton fibrés par fibrage mixte entre des fibres métalliques longues et fibres de verre courtes.et de l'ordre de 3% dans le cas des fibres métalliques courtes et des fibres de verre longues ; par contre l'ajout des fibres métalliques avec les deux dimensions la déférence peut atteindre jusqu'à 9.4%

Interprétation des résultats obtenus :

I-INFLUENCE DE LA LONGUEUR DES FIBRES :

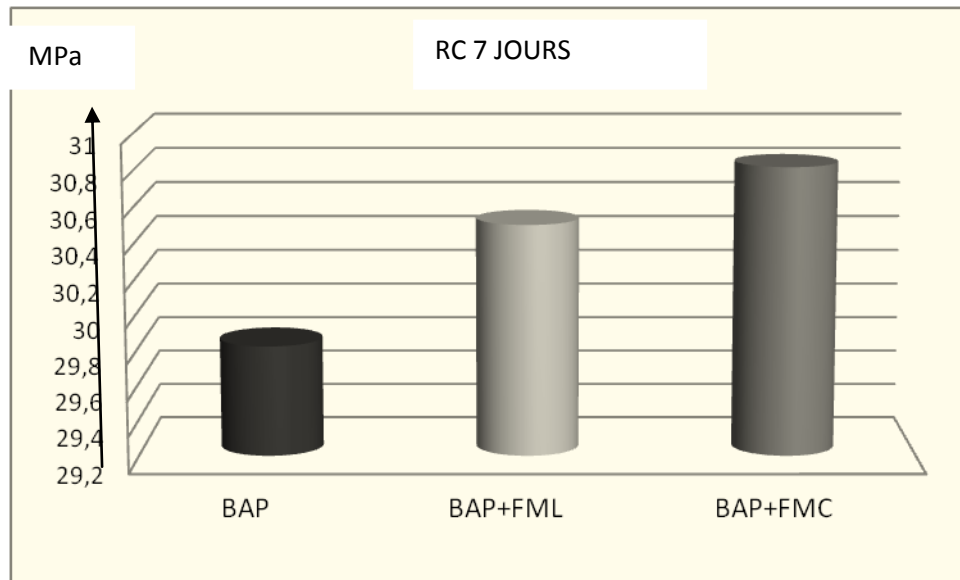


Fig74-1 Variation de la résistance a la compression en fonction de la longueur des fibres métalliques

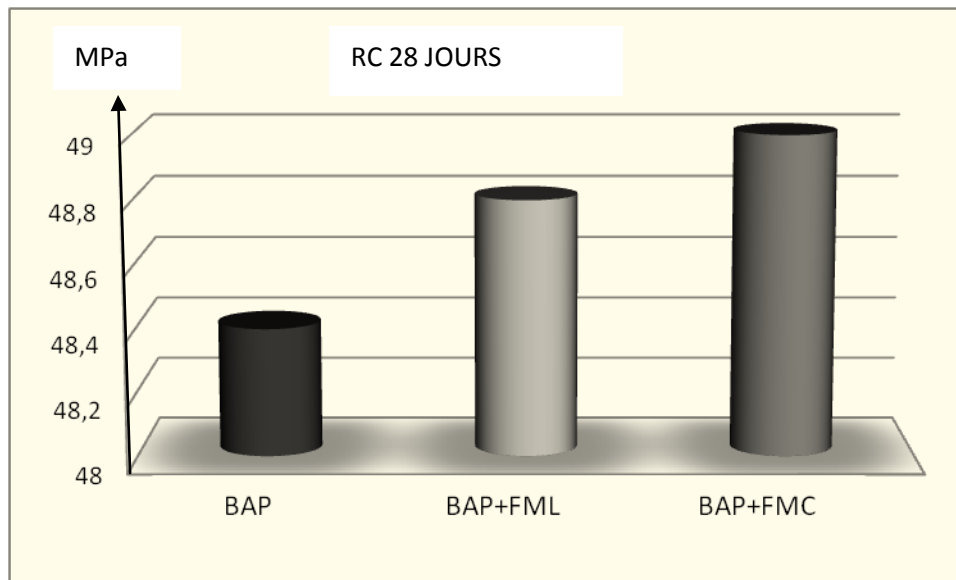


Fig74-2 Variation de la résistance a la compression en fonction de la longueur des fibres métalliques

Les deux figures précédentes présentent l'effet de dimension des fibres métalliques sur la résistance a la compression ; et comme la ductilité de ces fibres est proche a la ductilité du béton nous remarquons un accroissement de résistance avec une petite différence entre le béton renforcé par les fibres longues et celui qui est renforcé par les fibres courtes.

Donc on peut tirer que l'ajout des fibres métalliques au béton a toujours une influence positive sur sa résistance à la compression soit avec des petites ou grandes dimensions

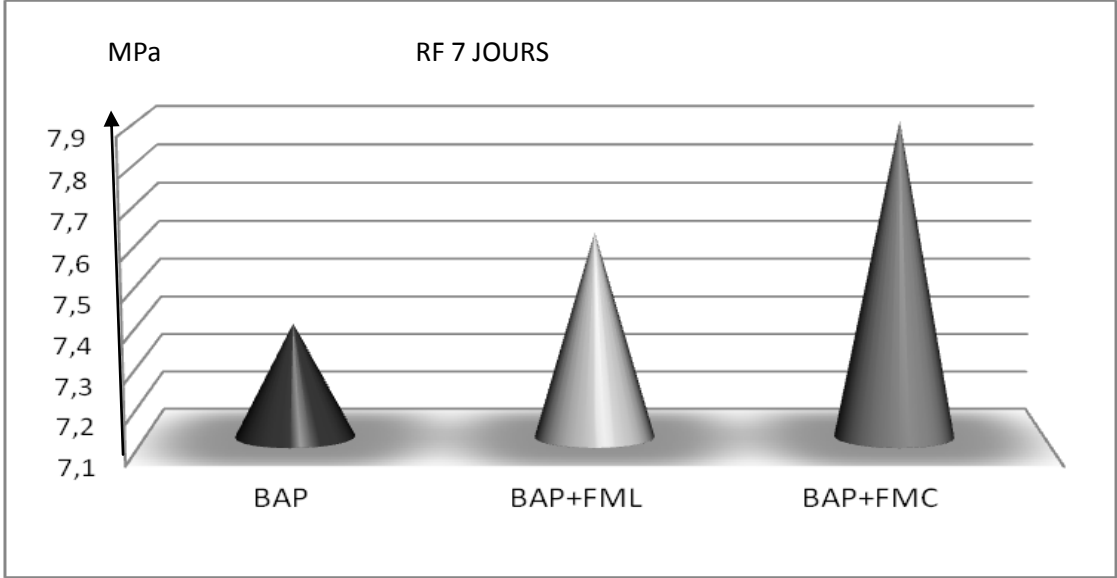


Fig75-1 : Variation de la résistance a la flexion en fontion de la longueur des fibres métalliques

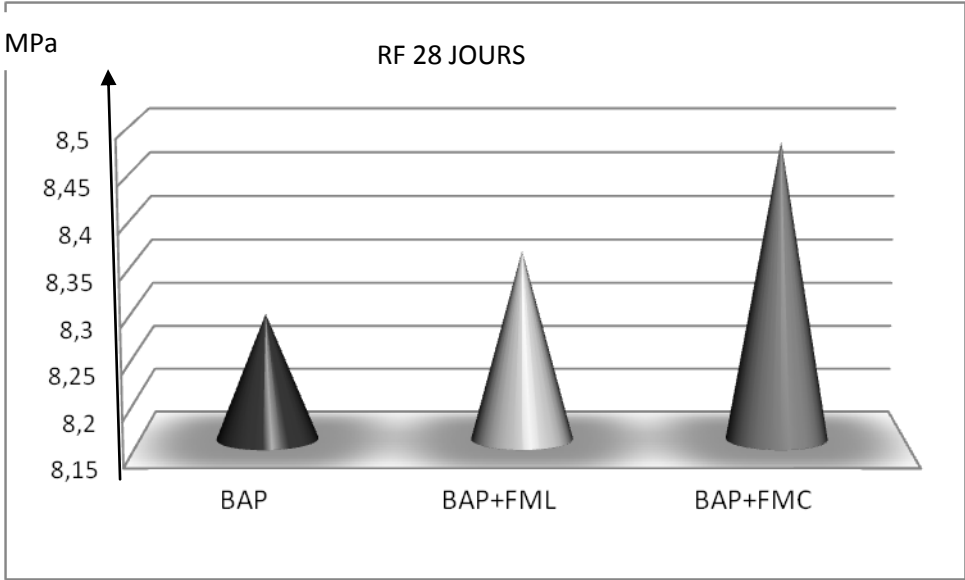


Fig75-2 : Variation de la résistance a la flexion en fontion de la longueur des fibres Métalliques

Concernant la résistance à la flexion qui pose un grand problème et fait l'objet de notre étude ; l'incorporation des fibres métalliques dans le béton améliore sa résistance à la flexion soit a 7jours ou à 28 jours comme il est présenté dans les figures ci-dessus

Nous remarquons aussi que les fibres courtes donnent des résistances plus élevées par rapport au fibres longues , et ce peut s'expliquer par le role des fibres courtes qui fait la couture de microfissure avant qu'elle se développe et devient une macrofissure ;et elle limite la propagation de cette dernière

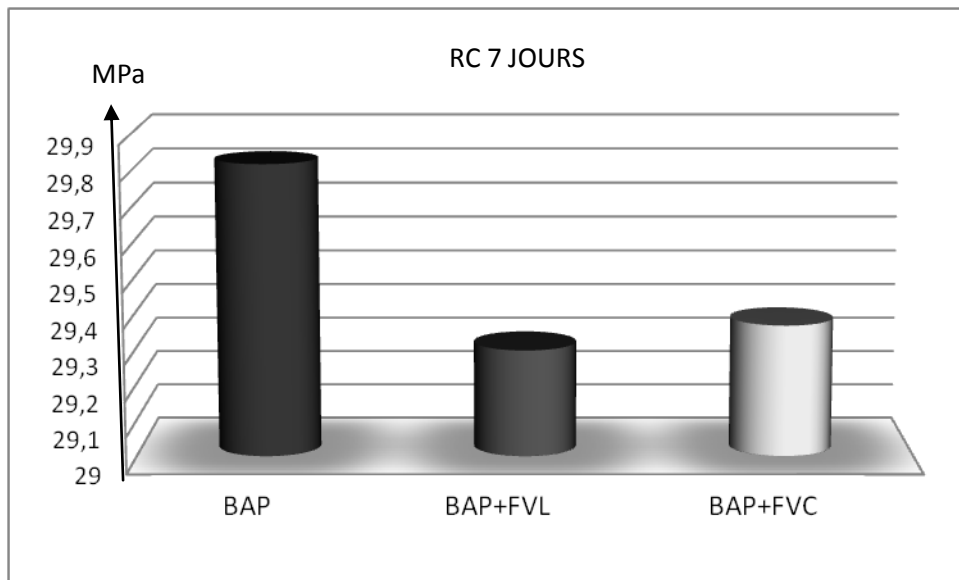


Fig76-1 : Variation de la résistance a la compression en fonction de la longueur des fibres de verre

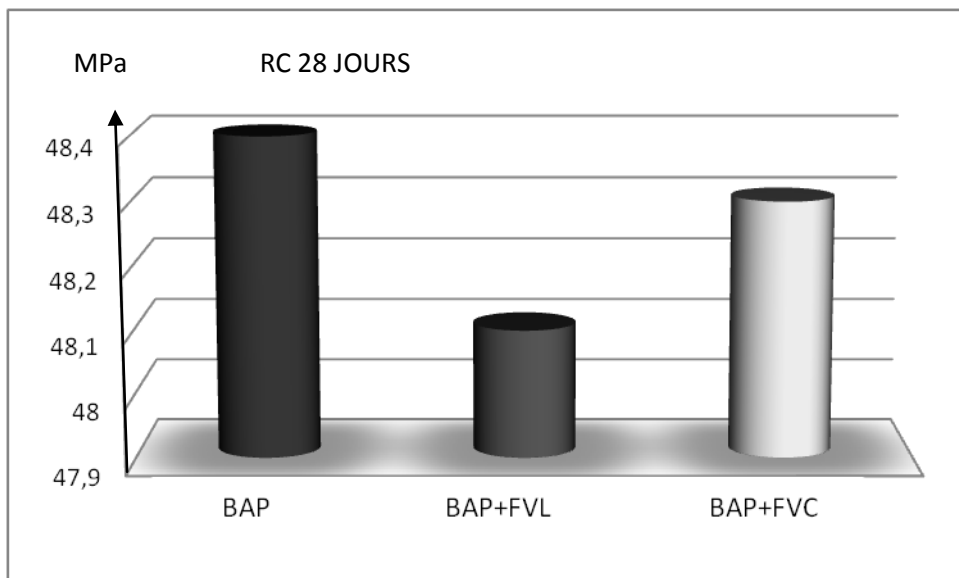


Fig76-2 : Variation de la résistance a la compression en fonction de la longueur des fibres de verre

D'après les figures ci-dessus on observe qu'on a une légère diminution de la résistance à la compression dans les bétons renforcés par des fibres de verre par rapport au béton témoin, et comme la matrice est relativement forte on peut conclure que les fibres ne contribuent qu'après la rupture de la matrice

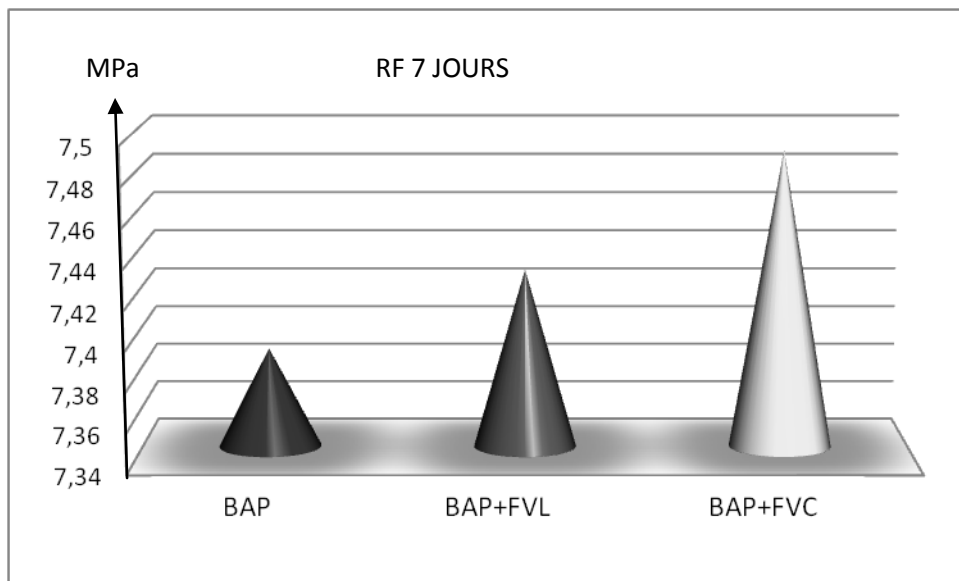


Fig77-1 : Variation de la résistance a la flexion en fonction de la longueur des fibres de verre

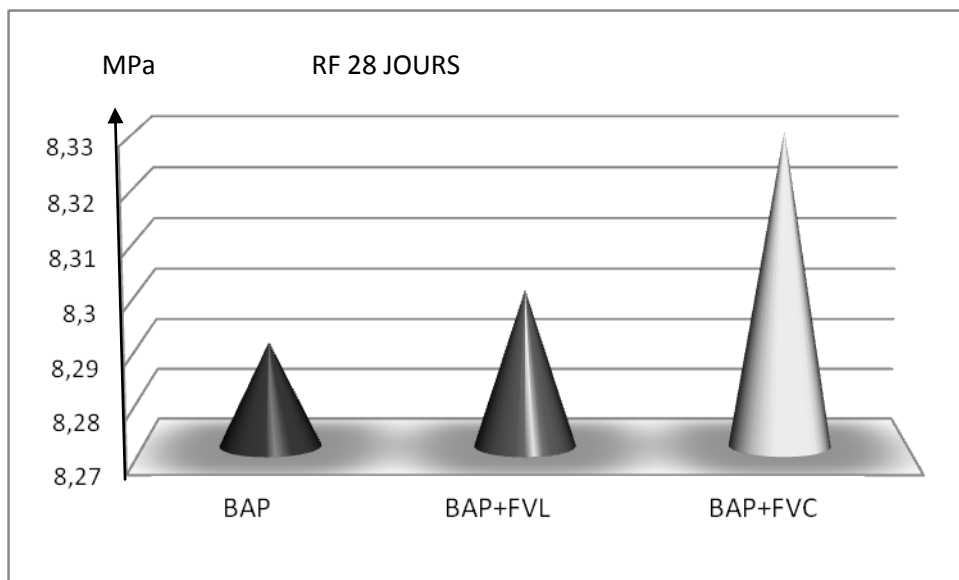


Fig77-2 : Variation de la résistance a la flexion en fonction de la longueur des fibres de verre

L'ajout des fibres de verre dans le béton améliore sa résistance à la flexion comme le montre les figures ci-dessus et ça due à la bonne dispersion de ces fibres dans la matrice et sa capacité d'empêcher la naissance des microfissures.

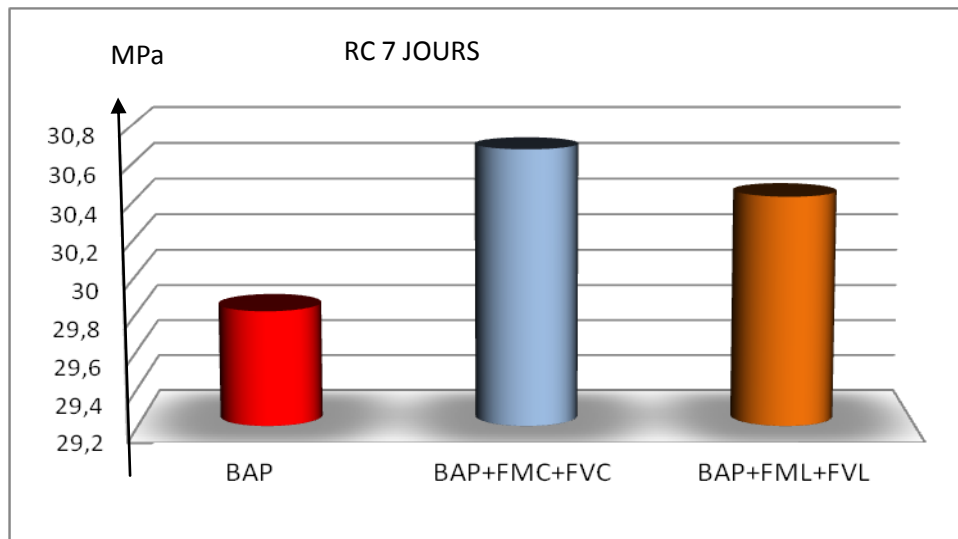


Figure 78-1 : Variation de la résistance a la compression en fonction du type et da la longueur des fibres

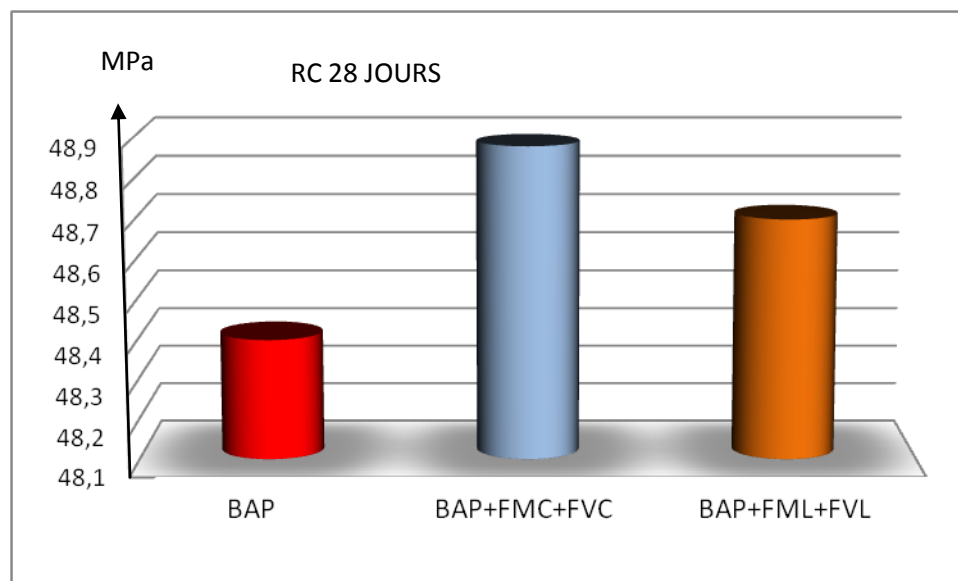


Figure 78-2 Variation de la résistance a la compression en fonction du type et da la longueur des fibres

Nous avons confectionné deux formulations de béton bi-fibré l'une contient deux types de fibres (métallique+verre) courtes (3cm) et l'autre contient les mêmes types de fibres mais avec des dimensions longues (6cm).

Les figures précédentes éclaircissent les résultats obtenus.

Concernant la résistance à la compression et comme le béton ne pose pas de problème au niveau de cette dernière en peut négliger l'effet de ces fibres.

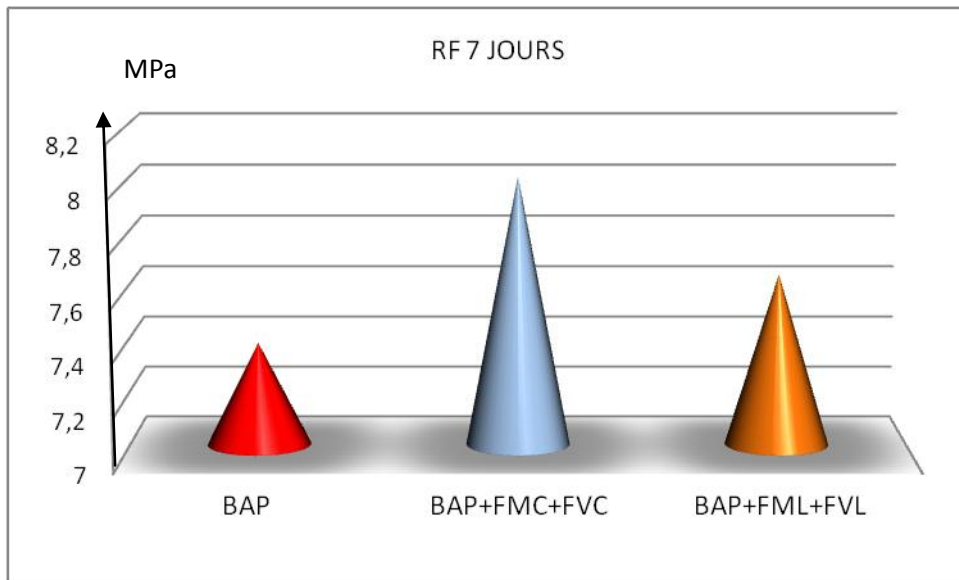


Fig79-1:Variation de la résistance a la flexion en fonction du type et da la longueur des fibres

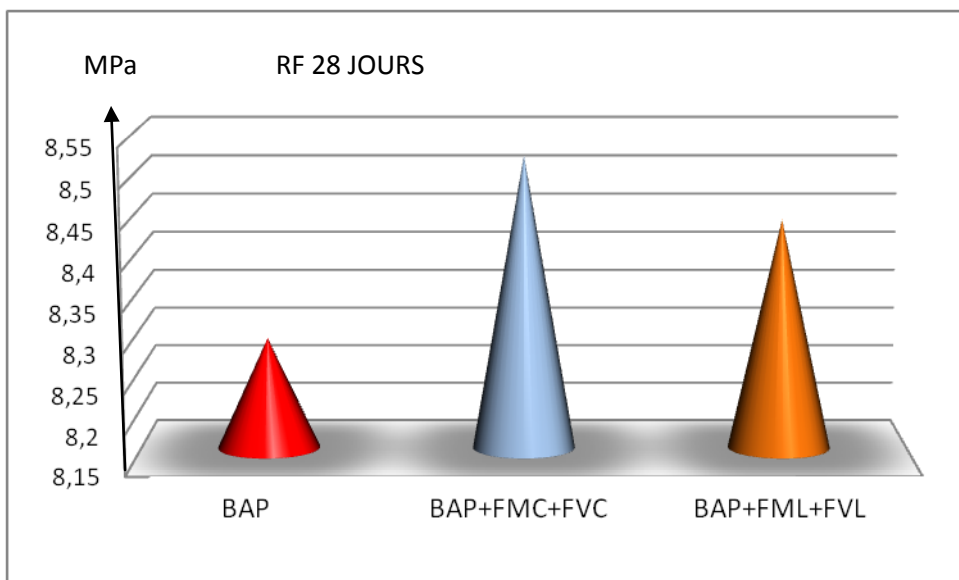


Fig79-2:Variation de la résistance a la flexion en fonction du type et de la longueur des fibres

Comme nous avons déjà vu que les deux types de fibres améliorent la résistance à la flexion du béton ; l'assemblage des deux types de fibres de même longueur dans le béton donne des résultats multiples par rapport aux bétons fibrés par un seul type de fibre

II-INFLUENCE DE LE NATURE DES FIBRES :

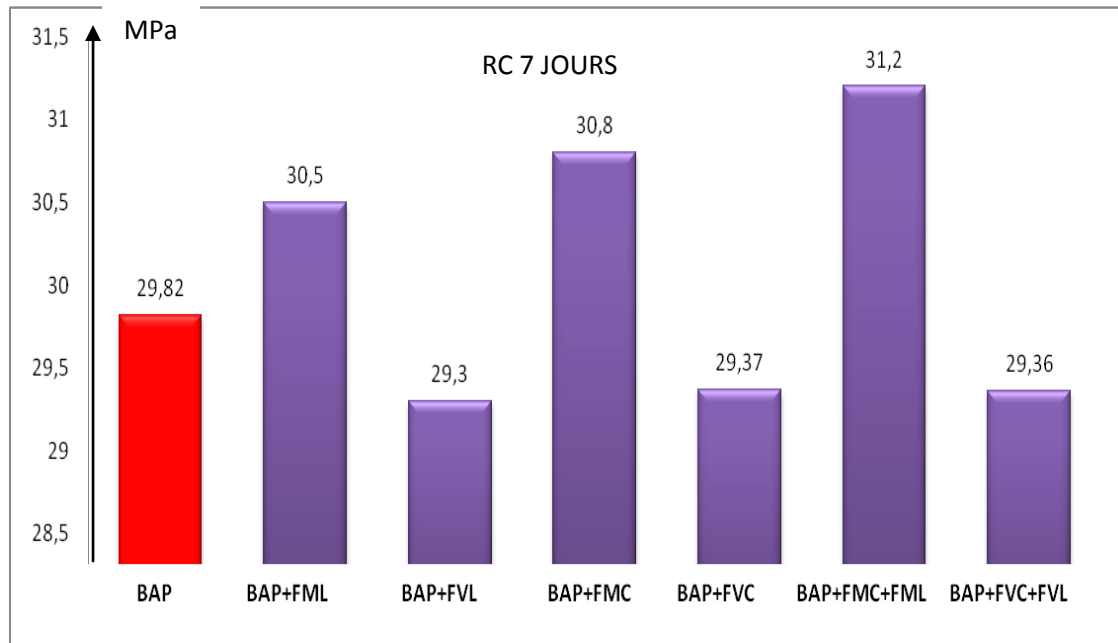


Fig 80-1 : Influence de la nature de fibres sur la résistance a la compression du béton autoplaçant

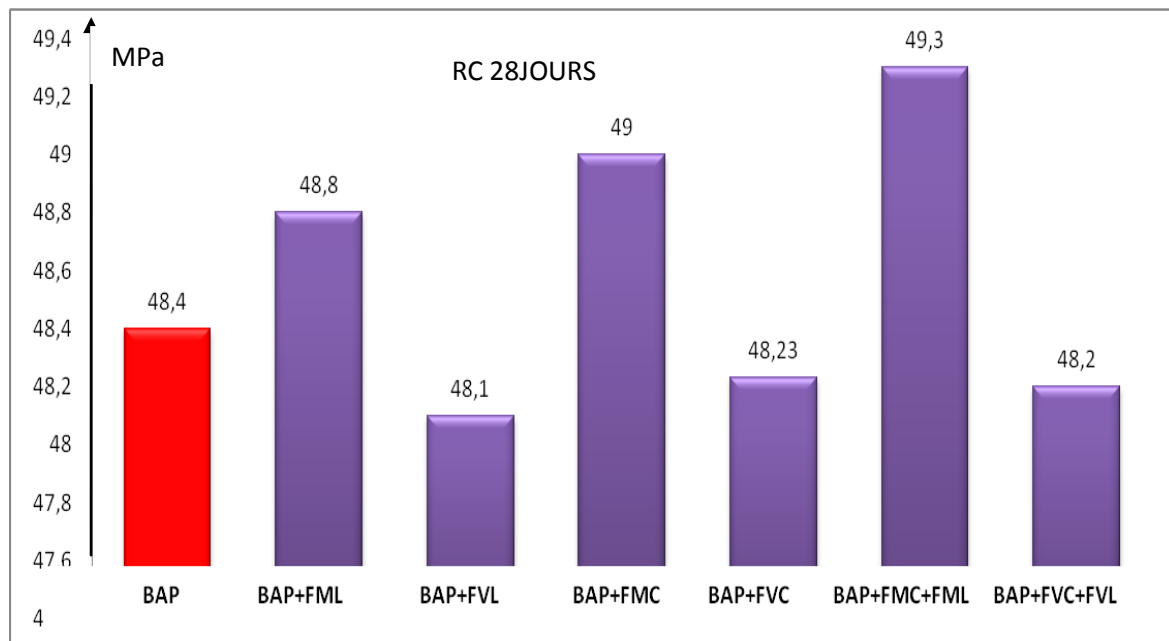


Fig 80-2 : Influence de la nature de fibres sur la résistance a la compression du béton autoplaçant

-Dons le but d'étudier l'effet de la nature des fibres sur les propriétés des bétons autoplaçants ; nous avons réalisé plusieurs formulations.

-Les résultats de la figure précédente montrent que les fibres de verre abaissent la résistance à la compression et comme le béton est connu par sa ductilité à la compression une diminution de l'ordre de 0.35% ne pose pas un grand problème. En peut expliquer cette

diminution par la formation des pelotes a l'intérieur de la matrice ainsi que la création des pores interne .Comme nous avons remarqué que même le mélange des fibres courtes avec des fibres longues donne presque les mêmes résultats.

-Par contre dans le cas des bétons renforcé par des fibres métalliques on remarque qu'il ya un accroissement de résistance et ça due a la ductilité de ces fibres.

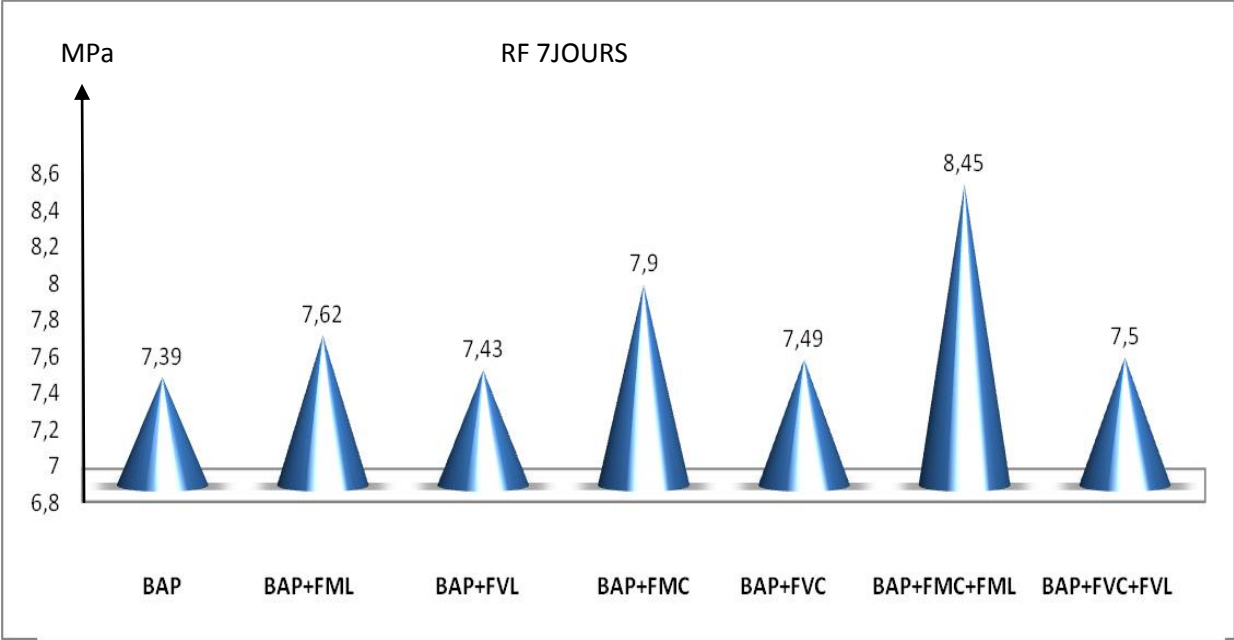


Fig 81-1 : Influence de la nature de fibres sur la résistance a la flexion du béton autoplaçant

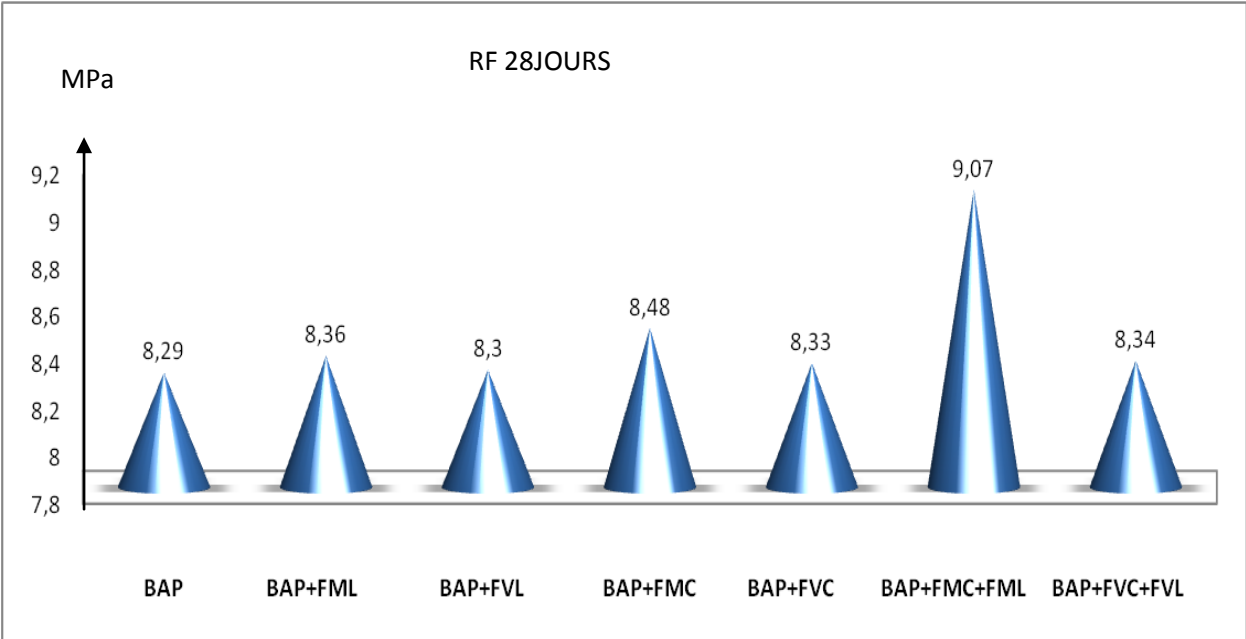


Fig 81-2 : Influence de la nature de fibres sur la résistance a la flexion du béton autoplaçant

Les histogrammes précédents nous montrent l'influence de la nature des fibres sur la résistance à la traction de béton autoplaçant.

D'après ces résultats nous concluons que le renforcement du béton par l'incorporation des fibres a toujours une influence positive sur sa résistance à la flexion (soit par l'ajout des fibres de verre ou des fibres métalliques)

Sauf que les fibres métalliques donnent au béton plus de performance par rapport au fibres de verre ; et ça due à la ductilité de ces fibres et ça rigidité

III-INFLUENCE DE L'HYBRIDATION (LONGUEUR –NATURE) :

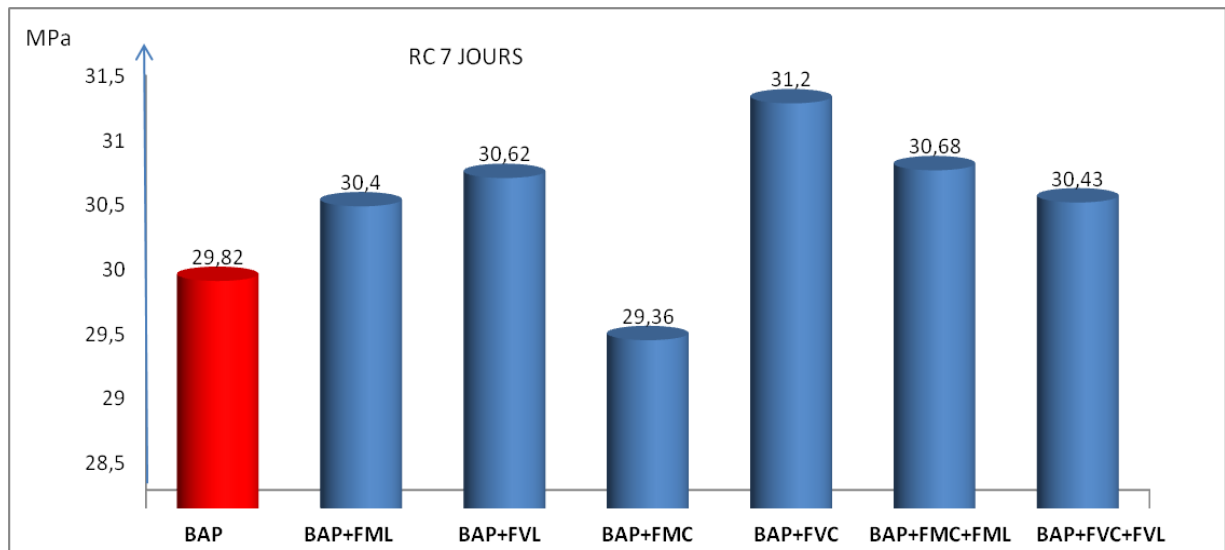


Fig82-1 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance a la compression du béton autoplaçant

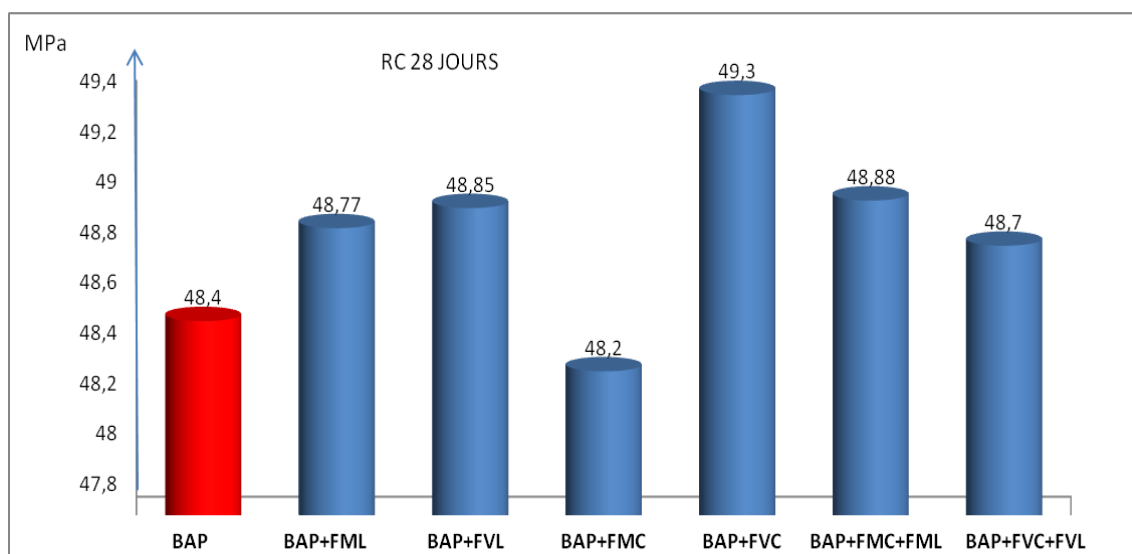


Fig82-2 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance à la compression du béton autoplaçant

D'après les résultats présentés dans les figures précédentes on peut conclure que la combinaison des fibres de verre courtes et longues dans le béton abaisse sa résistance à la compression et comme le béton ne pose pas de problème on peut négliger l'effet de ces fibres devant la résistance de béton.

Pour le béton contient les deux types de fibres avec les différents dimensions nous avons une amélioration remarquable de résistance à la compression au niveau des deux bétons mais avec une petite différence due a l'effet supérieur des fibres métalliques courtes par rapport aux fibres longues.

Le béton ne contenant que les fibres métalliques avec les deux dimensions à une meilleure résistance à la compression grâce à la combinaison de l'effet des deux longueurs de fibres.

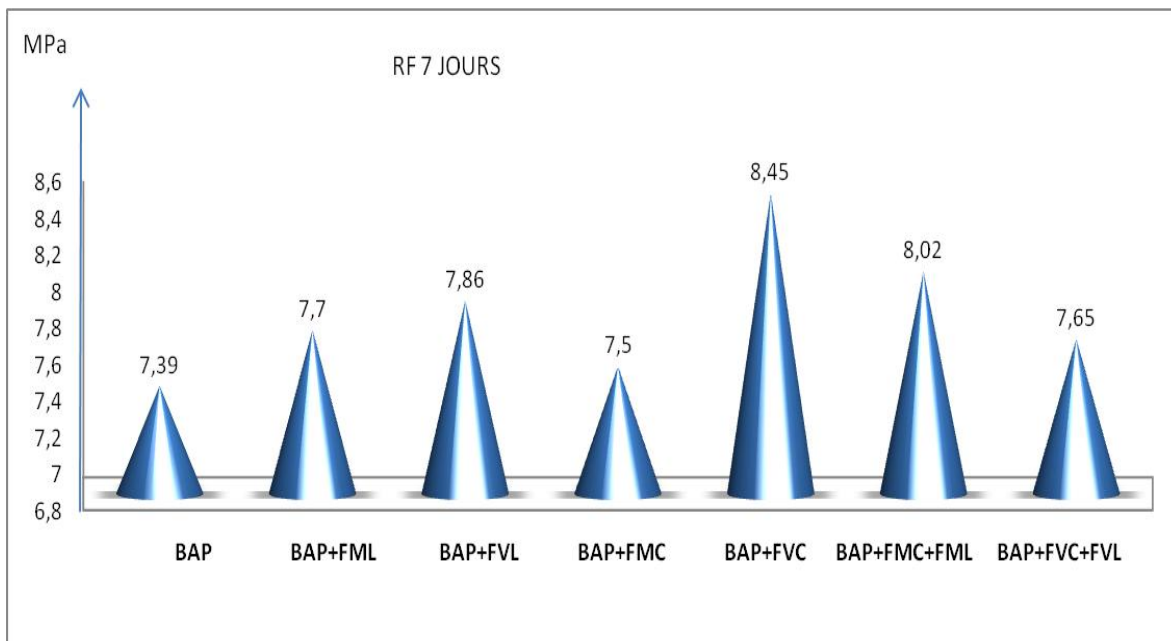


Fig83-1 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance à la flexion du béton autoplaçant

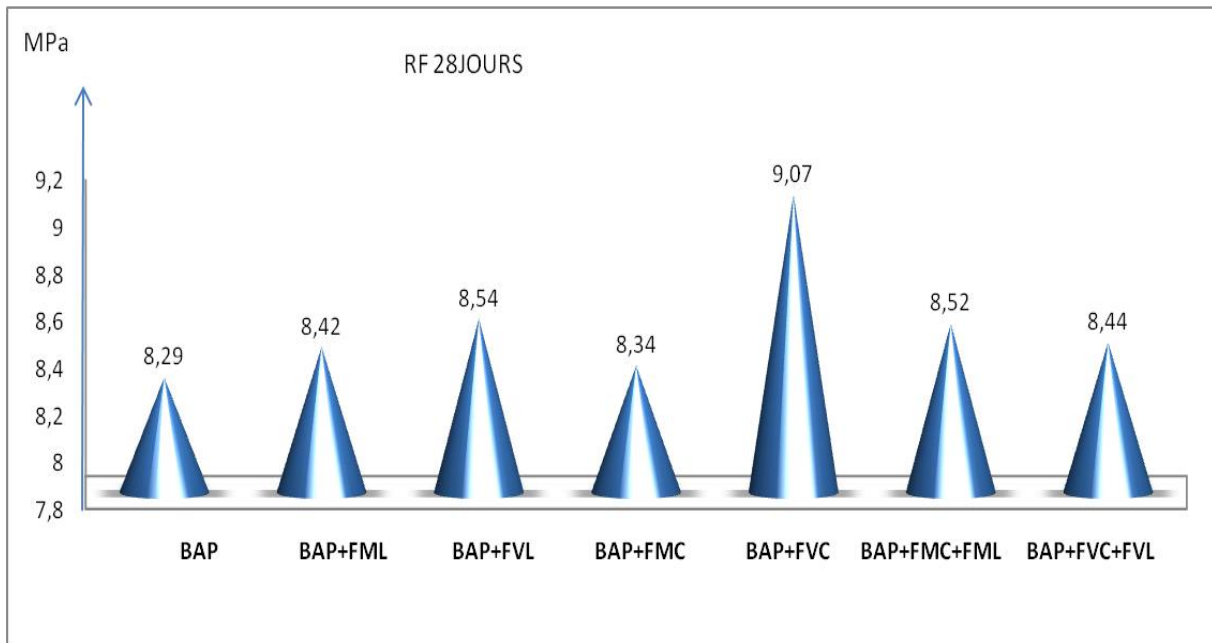


Fig83-2 : Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance à la flexion du béton autoplaçant
 D'après les résultats obtenus dans les figures précédentes, nous observons que tous les bétons fibrés par un fibrage mixte inscrivent des résistances à la flexion plus importantes que le béton témoin.

Le renforcement du béton fibré par les fibres de verres longues et courtes améliore sa résistance de 0.6% par rapport au béton de référence et ça due à la ductilité de ces fibres qui s'enchevêtrent entre elles et produire un réseau à l'intérieur du béton

Aussi ça capacité de s'élonger avec la propagation des fissures et comme nous avons utilisé deux différentes longueurs de fibres donc le contrôle de propagation des fissures se fait à l'échelle des micros et macro fissures.

Aussi dans le cas de béton bi-fibré par l'ajout des deux types de fibres nous remarquons un accroissement de résistance plus important par rapport au béton contient un seul type de fibre et ça due à la présence des fibres métalliques qui ont une ductilité plus importante par rapport aux fibres de verre et comme les fibres métalliques courtes sont plus efficaces par rapport aux fibres longue ils inscrivent une résistance plus grande.

Et en parallèle la combinaison des fibres métalliques courtes et longues dans le même béton lui offrent une évolution de résistance allée jusqu'à 9.4% de différence par rapport au béton témoin.

VI-INFLUENCE DE LA LONGUEUR ET LA NATURE DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA TRACTION PAR FENDAGE DES BETONS AUTOPLAÇANTS



Fig 84: Essai de traction par fendage

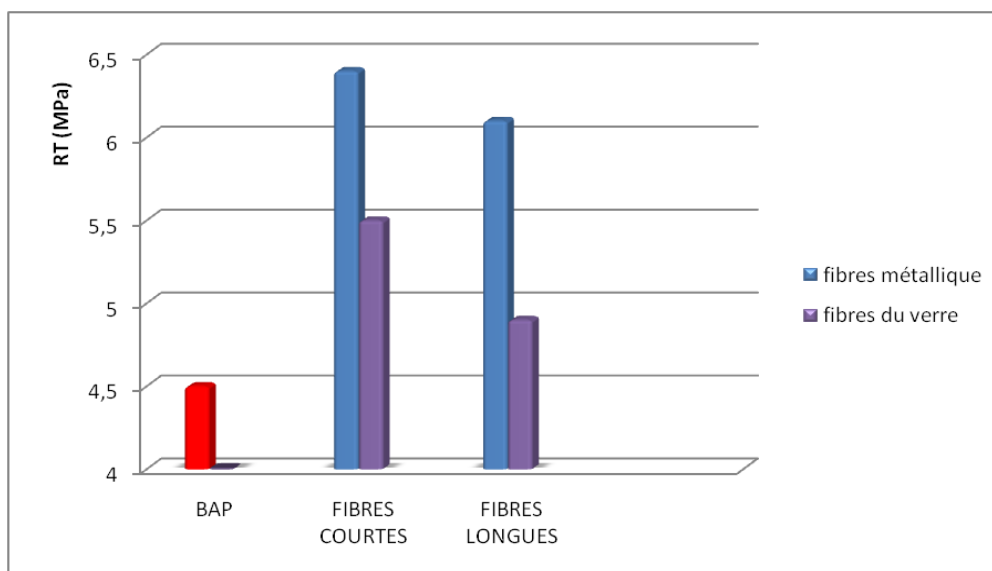


Fig85:Influence de longueur des fibres sur la résistance a la traction des BAPF

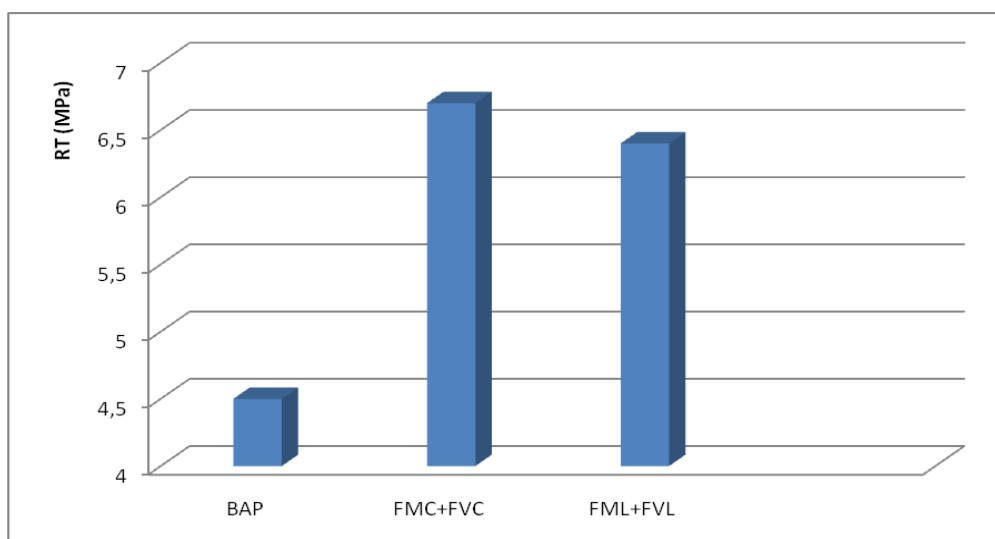


Fig 86:Influence de l'hybridation des fibres sur la résistance a la traction du béton autoplaçant

-L'introduction de fibres dans la composition d'un BAP permet une augmentation considérable de sa résistance à la traction par fendage. Sur les figures précédentes, on remarque qu'à 28 jours la résistance à la traction par fendage des bétons BAP+ fibres métalliques et BAP+fibres de verre ont augmenté respectivement de 40.45% pour les fibres métalliques courtes et de 35% pour les fibres métalliques longues suite à l'introduction de 1.75% de fibres dans leurs compositions. Et de 9% pour les fibres de verre longues et 13.33% pour les fibres de verre courtes suite à l'introduction de 0.25% de fibres dans leurs compositions.

-Donc on peut tirer que l'introduction des fibres dans le béton influe positivement sur sa résistance. Surtout dans le cas des fibres métalliques où la résistance est supérieure de 27% par rapport aux fibres de verre.

-Dans le cas de l'hybridation nous avons toujours une amélioration de résistance de l'ordre de 43% ; avec une différence de l'ordre de 1% entre les deux bétons hybrides.

V-ETUDE DE RETRAIT

Dans cette partie, Nous allons analyser l'influence des fibres sur le retrait du béton.

On constate que le retrait est directement dépendant de la nature de fibres et de l'élançement de ces dernières



Fig 87 : Essai de retrait

-Les figures suivantes présentent l'influence des fibres métalliques et les fibres de verre sur le retrait du béton autoplaçant.

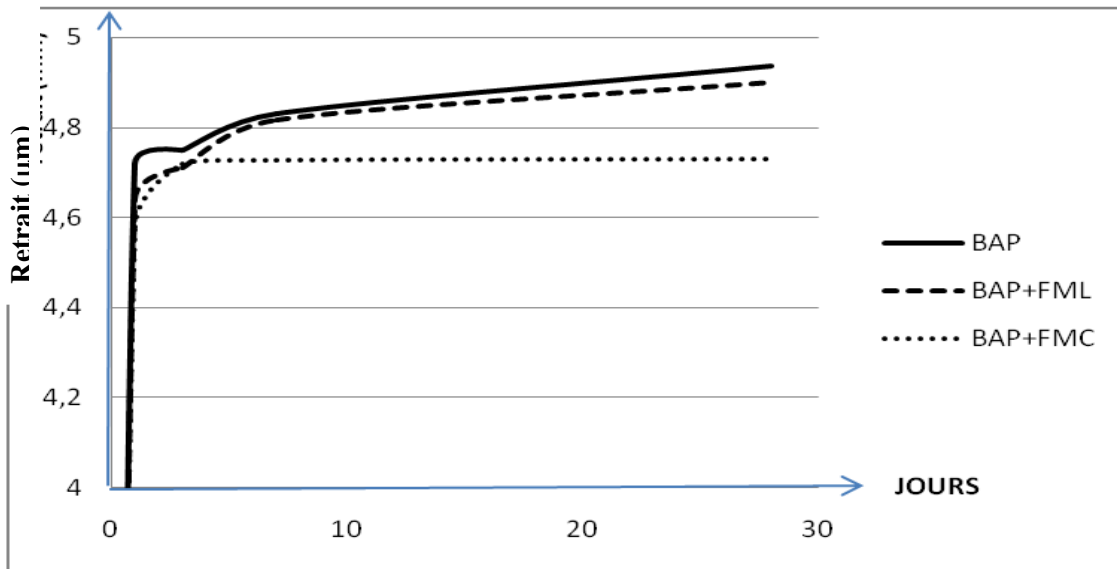


Fig88-Influence des fibres métalliques sur le retrait du béton autoplaçant

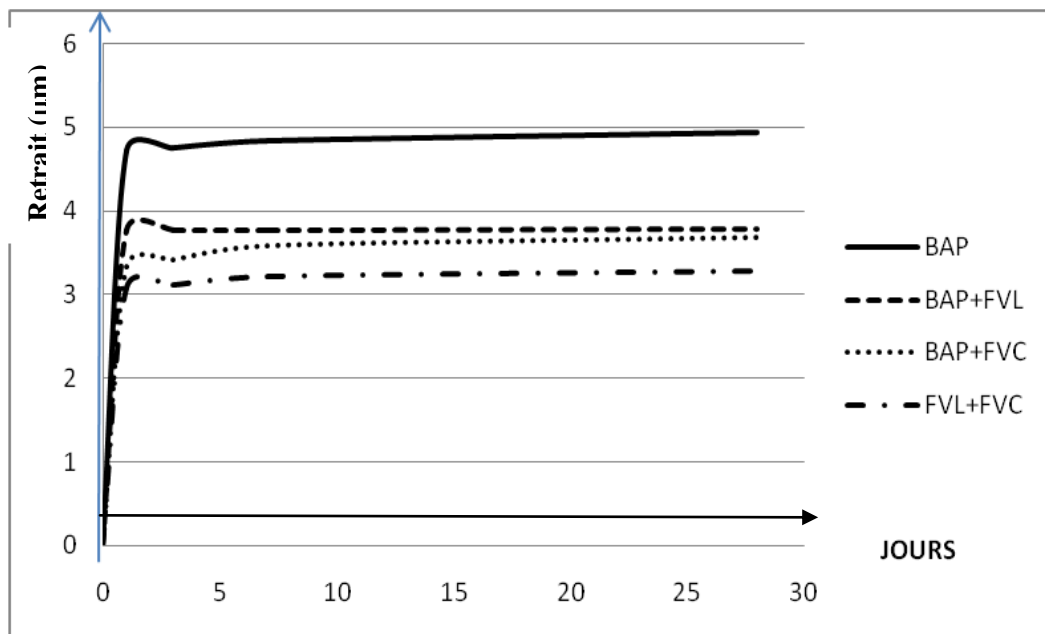


Fig89- Influence des fibres de verre sur le retrait de béton autoplaçant

INTERPRETATION

Les figures précédentes montrent l'influence de la nature des fibres sur l'évolution du retrait

La première figure montre que les courbes de retrait de BAP et BAPF par des fibres métalliques avec 1.75% de dosage de fibres sont presque identiques avec une légère variation de l'ordre de 0.71%.

Contrairement aux fibres de verre qui ont une influence remarquable sur le retrait du béton atteint jusqu'à 25.45%.

Concernant les dimensions des fibres nous avons trouvé que les fibres courtes et les fibres longues de même type de fibres donne des valeurs très proches (une différence de 0.1 mm entre les bétons fibrés par les fibres de verre courtes et longues)

IV-Modélisation de BAP fibré en compression (model de SARGIN) :

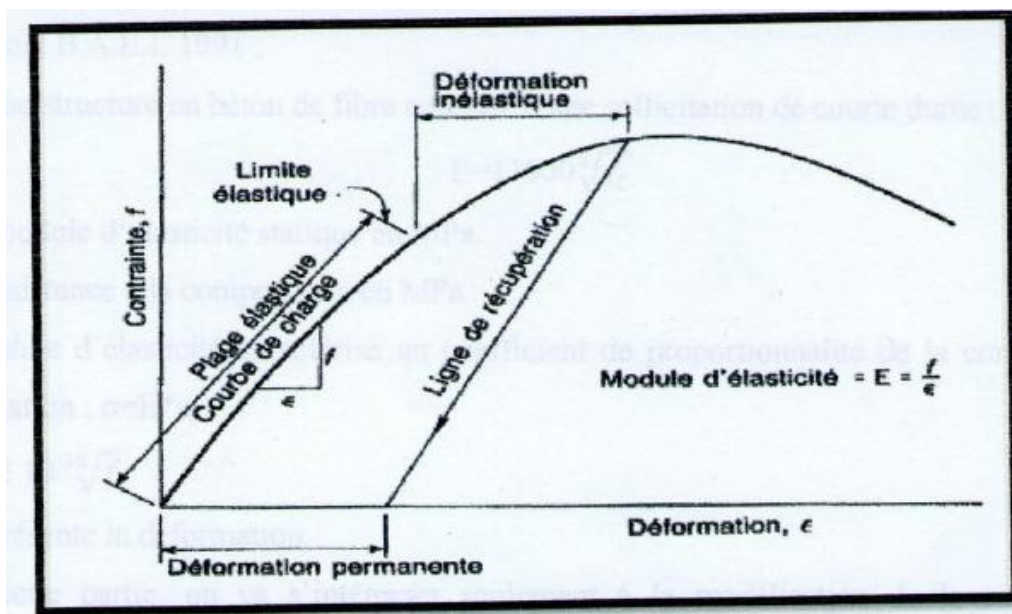


Figure 90 : DIAGRAMME CONTRAINTE-DEFORMATION

Le model sargin est employé dans le calcul des structures en béton armé et en béton précontraint, comme il est possible de l’employer pour les bétons de fibre.

La formule de SARGIN est donnée par :

$$\sigma = f_c \frac{R_b \cdot \epsilon_r + (R_c - 1) \cdot \epsilon_r^2}{1 + (R_b - 2) \cdot \epsilon_r + R_c \cdot \epsilon_r^2}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \text{ et } R_b = \frac{E_0 \cdot \epsilon_0}{f_c}$$

Avec : f_c est la résistance a la compression (contrainte maximale)

E_0 : module d’élasticité

ϵ_0 : déformation correspondant a la contrainte maximale.

Le paramètre R_c gouverne la branche descendante. En effet son augmentation permet de réduire la pente descendante de la loi de comportement ; elle permet par la même occasion de mieux approcher le comportement réel de composite.

Calcul du module d'élasticité à la déformation instantanée :

Le module d'élasticité statique est déterminé à partir de la formule établie par le règlement B.A.E.L1991 : pour une structure en béton de fibre soumise à une sollicitation de courte durée

$$E = 11000 \div \sqrt[3]{F_C}$$

E : le module d'élasticité statique en MPa

F_c : la résistance à la compression en MPa

Le module d'élasticité est caractérisé par le coefficient de proportionnalité de la contrainte à sa déformation : $\rho = E \cdot \epsilon_0$

$$\epsilon_0 = 0.62 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{F_C}$$

ϵ_0 : représente la déformation

Dans cette partie on va s'intéresser seulement à la modélisation de la résistance en compression à 28 jours pour les différentes compositions formulées précédemment

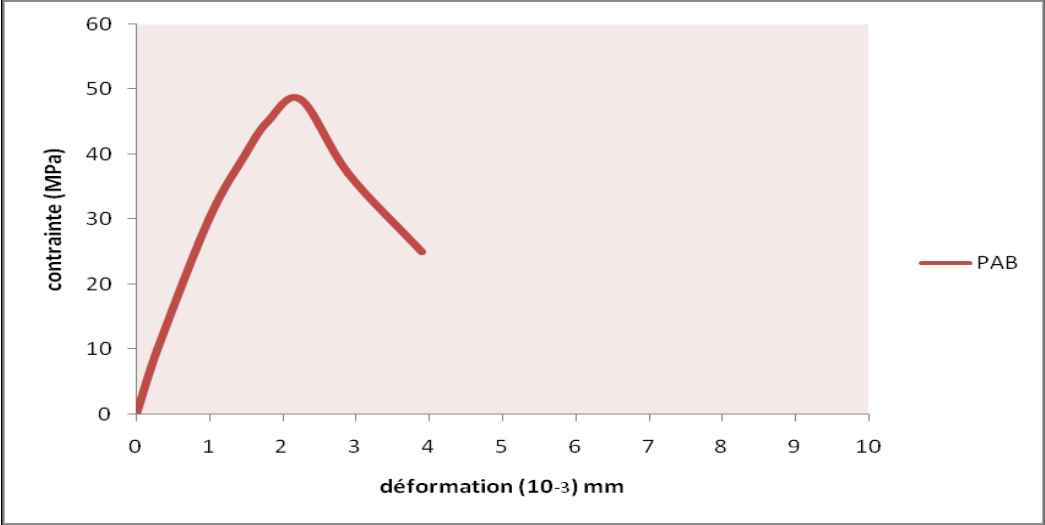
Tableau 36. Module d'élasticité statique et les déformations à la rupture :

<i>Caractéristiques</i>	<i>BAP</i>	<i>BAP+</i> <i>FML</i>	<i>BAP+</i> <i>FMC</i>	<i>BAP+</i> <i>FVL</i>	<i>BAP+</i> <i>FVC</i>	<i>BAP+</i> <i>FMC+</i> <i>FVC</i>	<i>PAB+</i> <i>FML+</i> <i>FVL</i>	<i>BAP+</i> <i>FVC+</i> <i>FML</i>	<i>BAP+</i> <i>FVL+</i> <i>FMC</i>
<i>FC</i>	48.4	48.8	49	48.1	48.23	48.88	48.7	48.77	48.85
<i>E(MPa)</i>	400087	40197	40252	40004	40040	40219	40170	40189	40211
$\epsilon_0(10^3)\text{mm}$	2.259	2.26	2.27	2.254	2.256	2.266	2.264	2.265	2.266

<i>BAP+</i> <i>FVC+</i> <i>FVL</i>	<i>BAP+</i> <i>FMC+</i> <i>FML</i>
48.2	49.3
40032	40334
2.256	2.273

A l'aide des résultats inscrits dans le tableau 36 et la formule de sargin on peut tracer les courbes contrainte-déformation suivantes

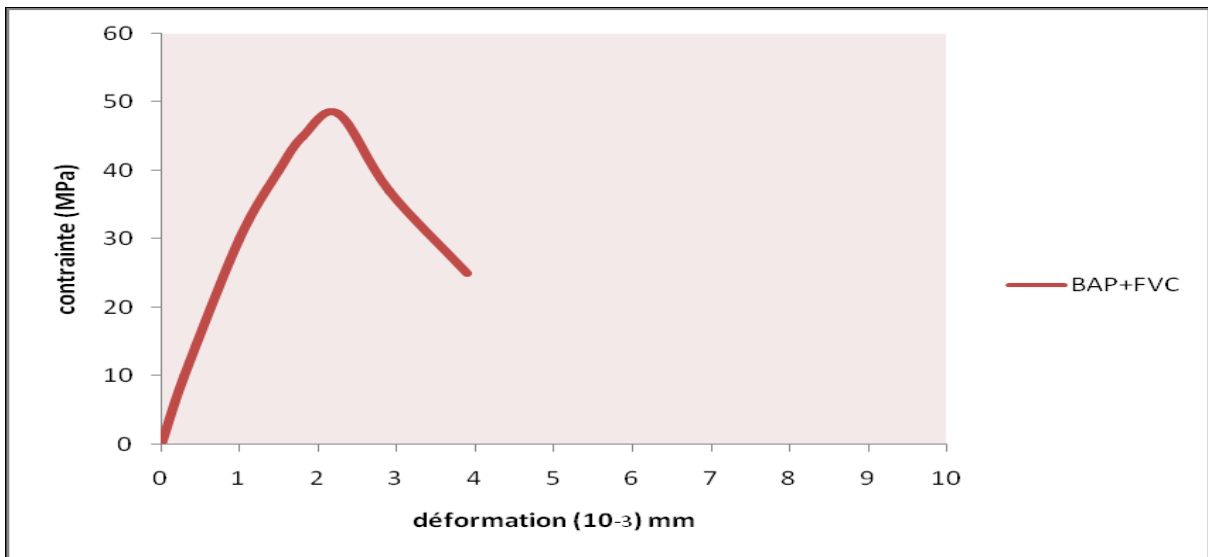
Les courbes obtenues sont les suivantes :



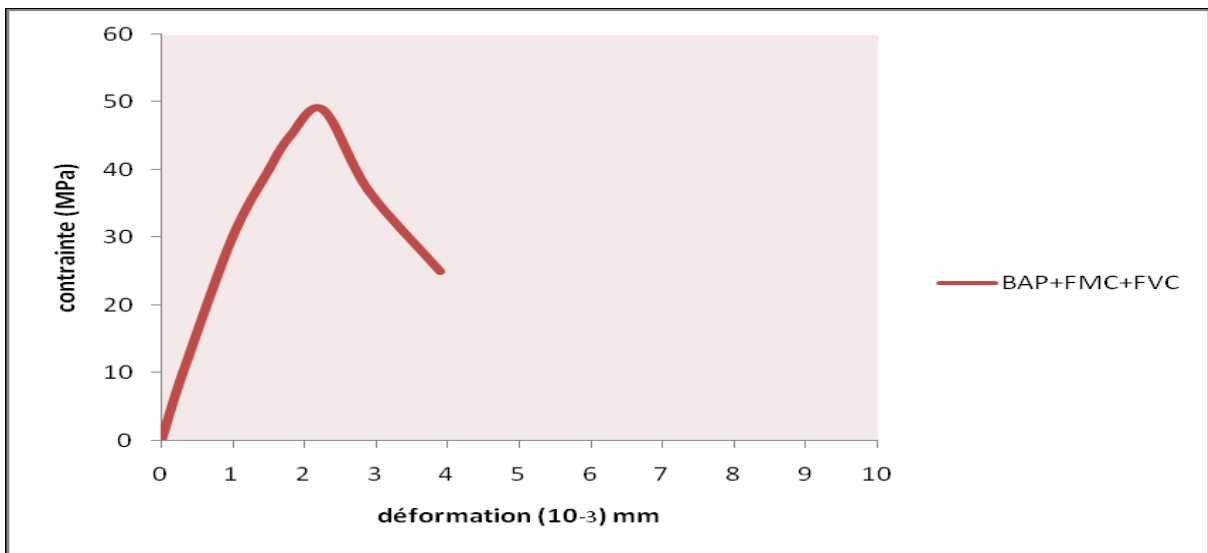
91-1 : Courbe contrainte –déformation pour BAP



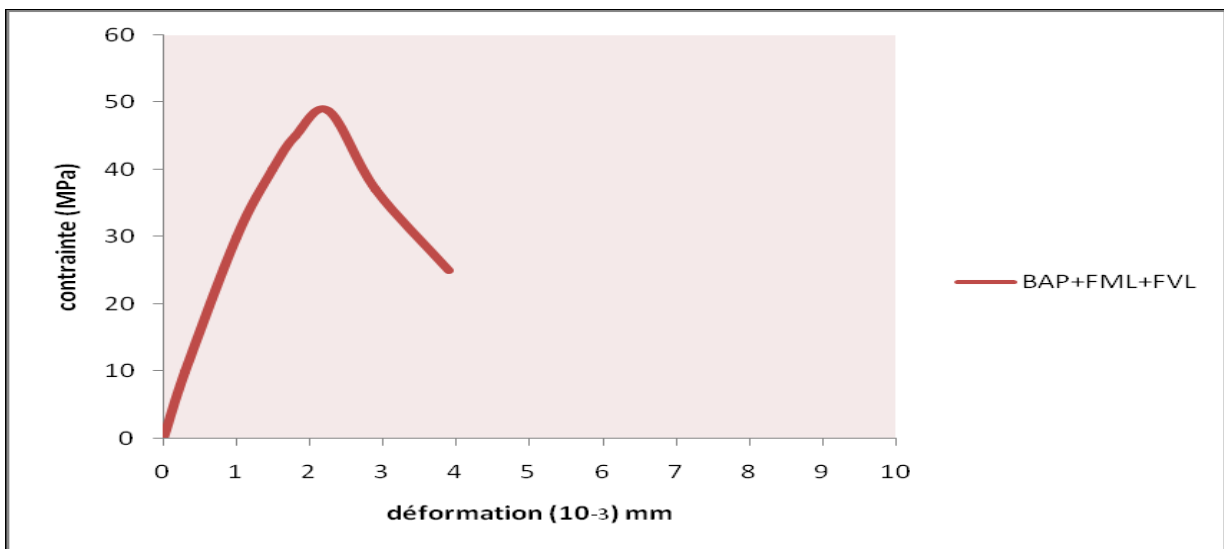
91-2 : Courbe contrainte –déformation pour BAP+FML



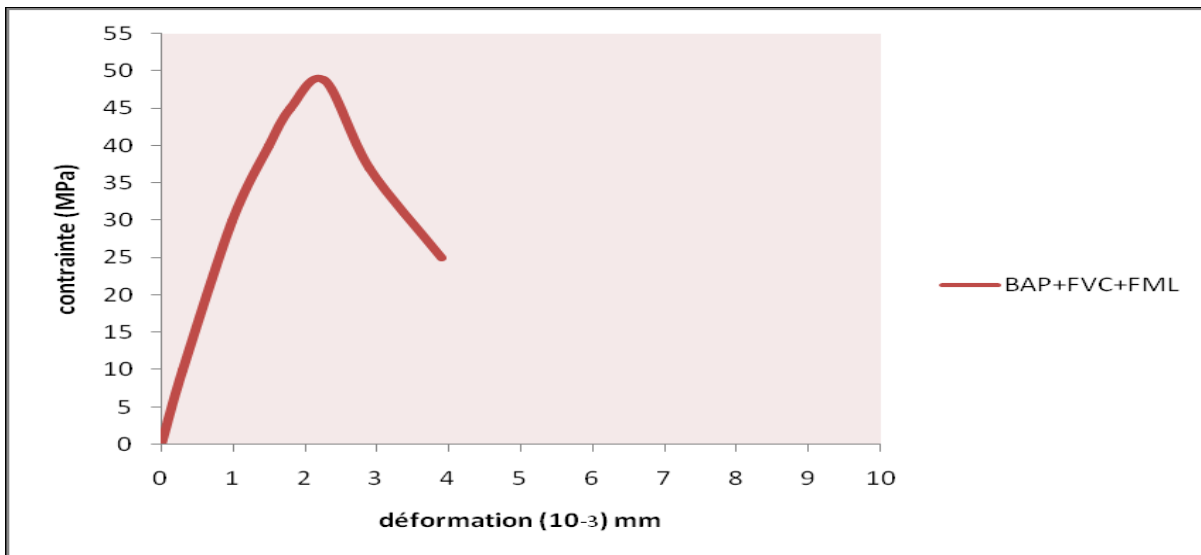
91-3 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FVC



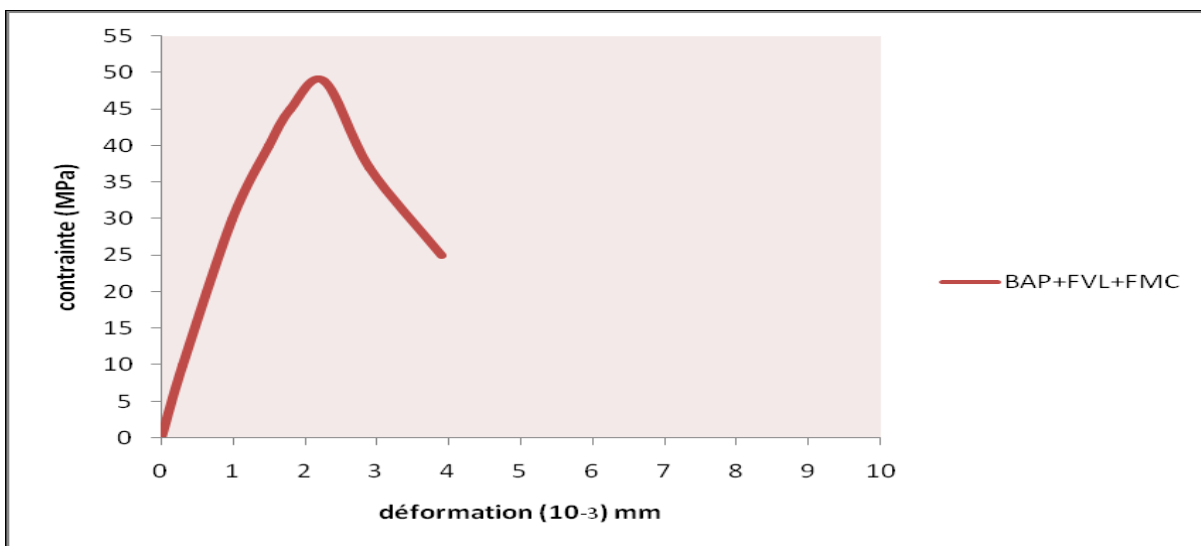
91.4 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FMC+FVC



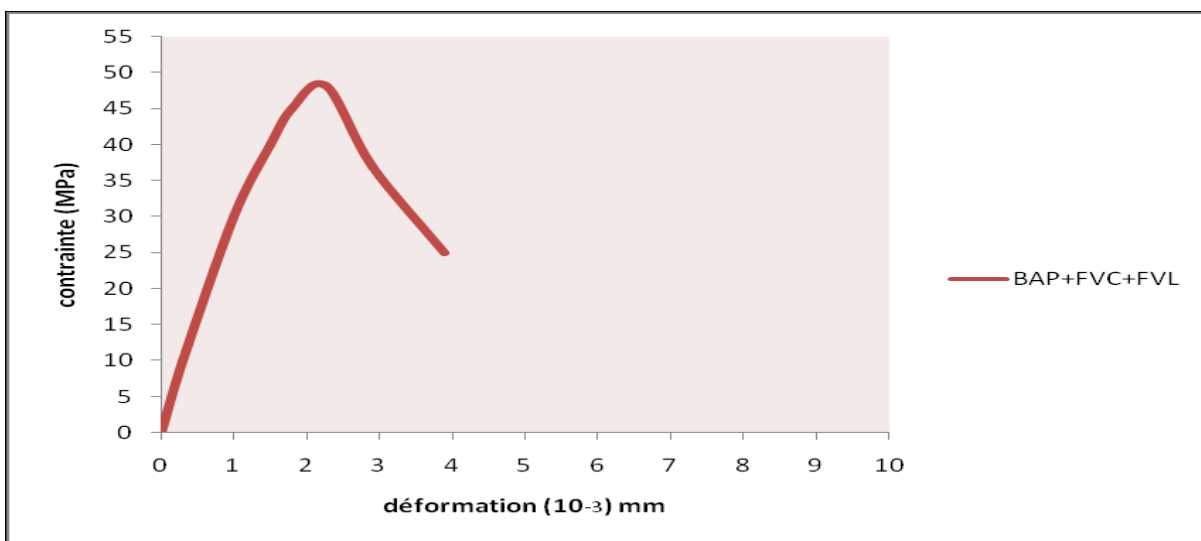
91-5 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FML+FVL



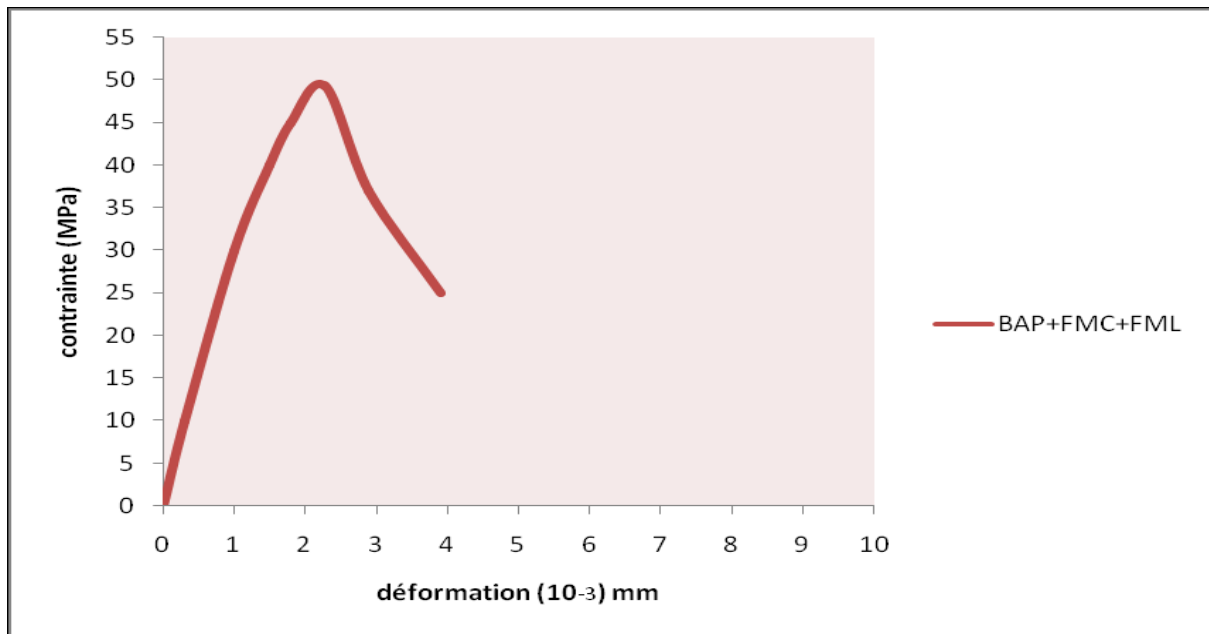
91-6 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FVC+FML



91-7 Courbe contrainte –déformation pour BAPFVL+FMC



91-8 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FVC+FVL



91-9 Courbe contrainte –déformation pour BAP+FMC+FML

Remarque :

Selon les courbes obtenus nous avons démontré notre résultats obtenus précédemment concernant la résistance a la compression

Ou nous remarquons d’après ces courbes que l’incorporation des fibres n’ apporte pas de grandes changement à l’état de rupture à la compression du béton et comme le béton ne pose pas un problème à l’état de la résistance à la compression l’jout des fibres reste toujours pour but d’amélioré la résistance à la flexion

Interprétation :

Ces courbes peuvent être décomposées en trois phases

- 1) Une phase pratiquement linéaire avant microfissuration de béton
- 2) Une phase courbée de la partie ascendante au cour de la quelle le béton se microfissure et les fibres se mettent en tension
- 3) Une phase descendante au cour de la quelle l’effort est repris par les fibres qui assemble le béton fissuré

Le comportement ductile de béton est assuré par l’encrage de ces fibres à la matrice lors de la mise en contrainte du béton fibré jusqu’à la rupture au moment de l’apparition des fissures les fibres empêchent leurs propagation

CONCLUSION GENERALE

Les bétons autoplaçants (BAP) constituent une nouvelle avancée pour la construction en béton et ils offrent en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique que sociaux. L'absence de vibration qui caractérise leur mise en place permet en effet de réduire les coûts globaux de production, de construire des éléments à géométrie complexe ou fortement ferrailés et également de réduire les nuisances sonores et la pénibilité du travail qu'ils nécessitent.

Nombreux sont les travaux de recherche qui ont pour but l'incorporation des fibres dans la matrice du béton, mais selon des axes différents, nous optons toujours pour des meilleures performances. Cette étude contribue sans aucun doute à la connaissance du comportement mécanique des bétons autoplaçants avec un renfort de fibres dans le but d'améliorer les performances mécaniques du BAP. La promesse d'éléments plus minces, plus résistants, plus légers et moins sujets à la fissuration rend cette étude très intéressante.

Les bétons sont connus par leurs fragilités en traction. L'introduction de fibres discontinues, aléatoirement réparties dans une matrice de béton elle-même de nature hétérogène et inélastique conduit à l'amélioration de nombreuses propriétés.

Les fibres limitent la formation et la propagation des fissures au sein de l'élément béton.

Elles causent à la fois les fissures existantes en empêchant leurs développements et limitent la formation d'autres fissures en renforçant la matrice cimentaire.

Notre étude pratique nous a permis de mettre au point la formulation, la caractérisation de béton autoplaçant (à l'état frais et durci), l'action des superplastifiants et ainsi que l'influence de types et dimension des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP.

À l'issue de cette étude nous tirons les conclusions suivantes :

1. L'utilisation d'un superplastifiant a permis d'avoir d'excellentes propriétés rhéologiques des BAPF ainsi que l'amélioration des résistances mécaniques avec un rapport E/C+F plus faible.
2. L'emploi des fillers calcaires comme ajout minéral fin dans les BAP permet également d'améliorer les propriétés rhéologiques de ce dernier
3. la méthode de formulation LGC par sa simplicité dans l'application (exige moins de compétence et de matériels) a prouvé son efficacité pour la formulation des BAPF. Avec

l'obtention de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques. Elle peut être donc utilisée comme une méthode principale dans la formulation des BAPF.

4. on peut incorporer les fibres métalliques et les fibres de verre dans le béton autoplaçant sans détérioration de ses propriétés rhéologiques mais a des teneurs différentes. 0.25% pour les fibres de verre et jusqu'à 1.75% et plus pour les fibres métalliques.

5. les fibres métalliques améliorent les propriétés des BAP à l'état frais et durci et donnent des meilleurs résultats par rapport aux fibres de verre.

6. Les résultats tirés de nos essais expérimentaux montrent également qu'à dosage égal, les fibres courtes ont donné des meilleurs résultats par rapport aux fibres longues et cela est due à la couture des micros fissures qui empêchent l'apparition des macro fissures.

7. Les résultats obtenus confirment l'intérêt de la substitution des fibres longues par des fibres courtes tout en améliorant les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants

Perspectives

Dans le travail présenté dans ce mémoire, on s'est intéressé à la formulation, la caractérisation et aux propriétés des bétons autoplaçants avec l'ajout de deux types de fibres. Il serait intéressant de pouvoir étudier l'influence de la forme de ces fibres

Il serait aussi intéressant de conduire les mêmes études sur d'autres types de matériaux (d'autres sources de granulats, de ciment, d'adjuvants...).

Afin de mieux comprendre les différentes facettes de comportement de ce nouveau type de béton, il serait intéressant d'étudier d'autres propriétés à l'état durci; durabilité dans des milieux chimiquement agressifs, autres comportements mécaniques tel que la résistance à la fatigue, résistance au gel/dégel...

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1-BENKECHKACHE Ghofrane Etude de comportement differe des betons autoplacants

Influence des paramètres de composition et de chargement these de magister novembre 2007 universite mentouri constantine

2- Philippe TURCRY, retrait et fissuration des bétons autoplaçant

influence de la formulation, thèse de doctorat université de Nantes, Février 2004

3-Okamura H, K OZAWA and M .ouchi<< self-compacting concrete.structural concrete>>MARSH-2000

4-Association française de génie civil<<béton autoplaçant –recommandation provisoire>>, annales du batiment et des travaux publics, juin 2000

5- SEDRAN.T. rhéologies et rhéométrie des bétons.application au béton autonivlant

These de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées ; 1999

6-Maher el barrak contribution a l'etude de l'aptitude a l'ecoulement des betons autoplacants a l'etat frais Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil Université Toulouse III – Paul Sabatier

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions INSA/UPS – génie civil Soutenu le 12 juillet 2005

7-Baron J., Ollivier J.P., "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Editions Eyrolles, 1996.

8-Bombled J.P., Kalvenes O., "Comportement rhéologique des pâtes, mortiers et bétons", Revue des Matériaux de Construction, n° 617, 1967.

9- Larrard F., "Structures granulaires et formulations des bétons", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, avril 2000

10-Hu C., "Rhéologie des bétons fluides", Rapport issu de la thèse de doctorat de

l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, LCPC, 1995

11-Lange F., Mörte H., Rudert V., "Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties", Cement and Concrete Research, 27, 10, pp. 1481-1488, 1997.

12-Zhang X., Han J., "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of ciment paste", Cement and Concrete Research, 30, 5, pp. 827-830, 2000.

13-Nehdi M., Mindess S., Aïtcin P.-C., "Rheology of high-performance concrete :

Effect of ultrafine particles", Cement and Concrete Research, 28, 5, pp. 68 -

697, 1998

14-Cyr M., "Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires", thèse de doctorat en cotutelle, INSA de Toulouse et Université de Sherbrooke, 1999

15.Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R.< the influence of mineral admixtures on the reology of cement paste and concrete > Cement andConcre Reseach 31.2. pp.245-255,2001.

16.Cyr M., Mouret M., "Rheological characterization of superplasticized cement pastes containing mineral admixtures : Consequences on self-Compacting Concrete design", Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Allemagne, pp. 241-255, 2003.

- 17-Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y., "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio", *Cement and concrete Research*, 35, 3, pp. 532-539, 2005.
- 18- François perche adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments these de doctorat école polytechnique fédérale de lausanne
- 19-Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N., «Superplasticizers : Properties and Applications in Concrete», Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 1998.
- 20-Edmeades, R.M., Hewlett, P.C., «Cement Admixtures», in: «Lea's Chemistry of Cement and Concrete», (Hewlett P.C.,Ed)., Fourth Edition, Arnold, Ed., London, Great Britain, 1998.
- 21-Dawy, M., Shabaka, A.A., Nada, A. M. A., «Molecular Structure and Dielectric Properties of some Treated Lignins», *Polymer Degradation and Stability*, vol. 62, 1998, pp. 455-462
- 22-Elias, H.-G., «An Introduction to Polymer Science», Ed. VCH, Weinheim, 1997
- 23- PHAN Trung Hieu <Rhéologie et Stabilité des pâtes de ciments utilisées dans la formulation des Bétons Fluides>. these de doctorant l'école normale supérieure de cachan 25/12/06
- 24-Flatt R. J., Martys N. S., Bergström L. (2004) : La Rhéologie des Matériaux Cimentaires (The Rheology of Cementitious Materials). National Institute of Standards and Technology. Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux, N° 867, pp. 48-55, Juin-Juillet
- 25-Li Ch.-Z., Feng N.-Q., Li Y.-D., Chen R.-J. (2004) : Effects of polyethylene oxide chains on the performance of polycarboxylate-type water-reducers. *Cement and Concrete Research*.
- 26- Edwige nicolas compatibilités et incompatibilités liants cimentaires/superplastifiants
these doctotat de l'université henri poincaré et de l'université du Luxembourg Soutenue le 21 juin 2010 à l'Université du Luxembourg
- 27-JOLICOEUR C., SIMARD M.A. : Chemical admixture-cement interactions : phenomenology and physico-chemical concepts. *Cement and Concrete Composite*, Vol. 20, No. 2-3, pp. 87-101, 1998
- 28-JOLICOEUR C., NKINAMUBANZI P.-C., SIMARD M.-A., PIOTTE, M. : Progress in understanding the functional properties of superplasticizers in fresh concrete. *Proceedings of 4th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, ACI SP-148, pp. 63-88, 1994
- 29-FLATT R.J., HOUST Y.F. : A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 1169-1176, 2001.
- 30-TATTERSALL G.H., BANFILL P.F.G. : The rheology of fresh concrete. Pitman Publishing Inc., Londres, Royaume-Uni, 356 pages, 1983
- 31-. KREIJGER P.C. : Plasticizers and dispersing admixtures. *International congress on admixtures*, Londres, Royaume-Uni, 1980
32. TADMOR, R.; HERNANDAÑDEZ-ZAPATA, E.; CHEN, N.; PINCUS, P.; ISRAELACHVILI, J. N. : Debye length and double-layer forces in polyelectrolyte solutions. *Macromolecules*, Vol. 35, No. 6, pp. 2380-2388, 2002.

33. STANKOVICH, J.; CARNIE, S. L., Electrical Double Layer Interaction between Dissimilar Spherical Colloidal Particles and between a Sphere and a Plate: Nonlinear Poisson-Boltzmann Theory. *Langmuir*, Vol. 12, No. 6, pp. 1453-1461, 1996.
- 34-. GOUY, G. J. : Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *Journal de Physique*, Vol. 9, pp. 457-468, 1910.
- 35-. CHAPMAN D. L. : A contribution to the theory of electrocapillarity. *Philosophical Magazine*, Vol. 25, pp. 475-481, 1913
36. SALMANG H., SCHOLZE H. : *Keramik*. 3ème édition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
37. HOUST Y. F., FLATT R. J., BOWEN, P., HOFMANN H., MAEDER U., WIDMER J., SULSER U., BUERGE T. A. : Optimization of superplasticizers: From research to application. *Proceeding of the International RILEM Conference on the role of admixtures in High Performance Concrete*, RILEM Publications s.a.r.l., Cachan, France, pp. 121-134, 1999
38. NAWA T., EGUCHI H. : Effect of cement characteristics on the fluidity of cement paste containing an organic admixture". *Proceeding of the 9th International Congress on Cement Chemistry*, New Dehli, Inde, Vol. 4, pp. 579-603, 1992.
39. YOSHIOKA K., TAZAWA E.-I., KAWAI K., ENOHATA T. : Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 1507-1513, 2002
40. HIRSCH C.M. : *Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation*. Thèse de Doctorat, Technischen Universität, München, 2005
41. UCHIKAWA H., UCHIDA S., OGAWA K., HANEHARA S. : Influence of $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4 on the initial hydration of clinker having different burning degree. *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, No. 5, pp. 645-656, 1984.
42. BLASK O. : *Zur Rheologie von polymermodifizierten Bindemittelleimen und Mörtelsystemen*. Thèse de Doctorat, Universität Gesamthochschule Siegen, 2002.
- 43-. SAKAI E., DAIMON M. : Dispersion mechanisms of alite stabilized by superplasticizers containing polyethylene oxide graft chains. *Proceedings Fifth CANMET/ACI International Conference*, Roma. *Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, pp. 187- 201, 1997
44. YOSHIOKA K., SAKAI E., DAIMON M., KITAHARA A. : Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 80, No. 10, pp. 2667-2671, 1997
45. RAMACHANDRAN V.S., MALHOTRA V.M., JOLICOEUR C., SPIRATOS N. : *Superplasticizers : properties and applications in concrete*. CANMET, 404 pages, 1998.
46. GRIESSER A. : *Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures*. *Rheology, Phase Composition, Pore Water and Heat of Hydration of Cementitious Systems*. Thèse de Doctorat, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2002.

- 47-YAMADA K., OGAWA S., HANEHARA S. : Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase Cement and Concrete Research, Vol. 31, No. 3, pp. 375-383, 2001.
- 48-PLANK, J.; SCHWERD, R.; VLAD, D.; BRANDL, A.; CHATZIAGORASTOU, P.,
Kolloidchemische Aspekte zur Verflüssigung von Zementleimen mit Polycarboxylaten,
GDCh-Monographie, Vol. 31, pp. 58 -69, 2004.
49. PLANK, J., Current Developments on Concrete Admixtures in Europe Proceeding of the Symposium on Chemical Admixtures in Concrete, Dalian, Chine, pp. 13-27, 2004.
50. RICKERT J. : Wechselwirkungen zwischen Zementen und Betonzusatzmitteln. Technisch-wissenschaftliche Zementtagung, Nuremberg, Allemagne, 2005.
- 51- YAMADA K., TAKAHASHI T., HANEHARA S., MATSUHISA M. : Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 2, pp.197-207, 2000.
- 52 - Andersen P.J., Roy D., Gaidis J.M., «The Effect of Superplasticizer Molecular Weight on its Adsorption on, and Dispersion of, Cement», Cement and Concrete Research, vol. 18, 1988, pp. 980-986
- 53] Bonen, D., Sarkar, S. L., «The superplasticizer Adsorption Capacity of Cement Pastes, Pore Solution Composition, and Parameters affecting Flow Loss», Cement and Concrete Research, vol. 25, issue 7, 1995, pp. 1423-1434.
- 54- Uchikawa, H., Hanehara, S., Sawaki, D., «The Role of Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in fresh Paste prepared with Organic Admixtures», Cement and Concrete Research, vol. 27, 1997, pp. 37-50.
- 55- Flatt, R.J., «Polymeric Dispersants in Concrete», in: «Polymers in Particulate Systems: Properties and Applications», (Hackley, V.A., Somasundaran, P., Lewis, J.A., Eds.), Marcel Dekker, Ed., New York, U.S.A., 2002.
- 56- Blank B., Rossington D.R., Weinland L.A., «Adsorption of Admixtures on Portland Cement», Journal of the American Ceramic Society, vol. 46, 1963, pp. 395-399.
- 57- Vernet, C., Noworita, G., «Conductimetric Test for Cement - Admixture Systems», Proceedings of 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Dehli, vol. 4, 1992, pp. 627-633
58. Ramachandran, V.S., Malhotra, V.M., Jolicoeur, C., Spiratos, N., «Superplasticizers : Properties and Applications in Concrete», Ed. CANMET, Ottawa, Canada, 1998.
- 59- Yoshioka K., Tazawa E., Kawai K., Enohata T., «Adsorption Characteristics of Superplasticizers on Cement Components Minerals», Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 1507-1513.
- 60- Yoshioka, K., Tazawa, E-I, Kawaib, K., Enohata, T., «Adsorption Characteristics of

Superplasticizers on Cement Component Minerals», *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, pp. 1507–1513

61- Ohta, A., Sugiyama, T., Tanaka, Y., «Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers», *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, (Malhotra V.M., Ed.), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, U.S.A., 1997, SP-173, pp. 359-378

[62] Uchikawa, H., Sawaki, D., Hanekara, S., «Influence of King and Added Time Organic Admixture on the Composition, Structure and Property of Fresh Cement Paste», *Cement and Concrete Research*, vol. 25, 1995, pp. 353-364.

63- Khorami, J., Aïtcin, P.-C., «Physiochemical Characterization of Superplasticizers», *Proceedings of the 3rd International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, U.S.A., 1989, SP-119, pp. 117-131.

64- Coussot, P., Ancey, C., «Rheophysical Classification of Concentrated Suspensions and Granular Pastes», *Physical Review E*, Vol. 59, n°4, 1999, pp. 4445-4457.

66 : Nathalie Otis, thèse de doctorat (influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pate/granulats dans les matériaux cimentaire,) université de Sherbrooke, Mai 2000.

67 : BAALBAKI Moussa thèse doctorat, influence des interactions du couple ciment/adjuvant dispersant sur les propriétés de bétons « importance de mode d'introduction des adjuvants », université de Sherbrooke, Mas 1998.

68- Mouhamed irssel khalifa effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilite des betons autoplaçants these de doctotat de l'univetsite de constantine soutenue le 20 juin 2009

69-Stéphan assié <<durabilite des betons autoplaçants>> these de doctotat l'institut national des sciences appliquees de toulouse soutenue le 29 octobre 2004

70-OKAMURA H. and OUCHI M., “Self-compacting concrete. Development, present and future”, *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999.

71-HAYAKAWA M., MATSUOKA Y. and YOKOTA K., “Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan”, *Second CANMET/ACI on advances in concrete technology*, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.

72-NAGATAKI S. and FUJIWARA H., “Self compacting property of highly flowable concrete”, *Second CANMET/ACI on advances in concrete technology*, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 301-314, 1995

73-PETERSSON Ö., BILLBERG P. and VAN B.K., “A model for Self-Compacting Concrete”, *International Rilem Conference on ‘Production methods and workability of concrete’*, RILEM Proceedings 32, 1996.

74-SEDRAN T., « Les Bétons Autonivelants », *bulletin LCPC* 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.

75- CUSSIGH François article Ingénieur Vinci Construction France. 11 - 2007

- 76- Bensebti salah eddine formulation et propriétés des bétons autoplacants
à base de matériaux locaux these doctorat de universite mentouri-constantine Soutenue le 02
Juillet 2008
- 77-: BOUKNI Bariza tenue au feu des betons autoplacants
Mémoire de magister universite mentouri constantine decembre 2007
- 78-Philippe Turcry, « Retrait et Fissuration des Betons Autoplacants », Influence de
la Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.
- 79-Hasni, « Bétons Autoplacants », rapport de recherche N° 98-004/98-006,
Fédération Française du Batiment 1999.
- 80- Jie shen, ismail yurtdas*, cheikhna diagana & alex li une nouvelle méthode de formulation
des bétons autoplacants (bap)
laboratoire de génie civil, grespi, université de reims champagne Ardenne, UFR Sciences, Moulin
de la Housse, 51687 Reims Cedex 2- XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Nancy, 4
au 6 juin 2008
- 81- YAMMINE Joumana Rapport annuel 2005 - Etat d'avancement de la thèse
- 82-P.L. Domone, "A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting
concrete", Cement Concrete Composites 2006.
- 83-Burak Felekogç, Selcuk Turkel, Bulent Baradan, "Effect of water/cement
ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete" . Building and
Environment 2003
- 84- GOLASZEWSKI, J., SZWABOWSKI, J Influence of superplasticizer on rheological behaviour of
fresh cement mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 34, n° 2, p.235-248. . (2003)
- 85- Youcef FRITIH Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton
autoplacant armé these de doctorat de l'université de toulouse 08 Juillet 2009
- 86-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 December 2005
- 87-Groth P., (2000a) "Fibre reinforced concrete - Fracture mechanics methods applied on
selfcompacting concrete and energetically modified binders, PhD-thesis, Department of Civil and
Mining Engineering, Luleå University of Technology
- 88-Grunewald S., (2004) "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced
concrete", Diplom-Ingenieur Delft University of Technology
- 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.

Grunewald S., Walraven J.C., (2003) “Rheological measurements on Self-Compacting fibre reinforced concrete”, 3 rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.

Grunewald S., Walraven J.C., (2001) “Rheological Study on the Workability of Fiber-

Reinforced Mortar,” Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, K. Ozawa and M. Ouchi, eds., University of Tokyo, Japan, 2001, pp. 127-136.

Grunewald S., Walraven J.C., (2003) “Optimisation of the mixture composition of Self-Compacting fibre reinforced concrete”, 4 th International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2005, Chicago, USA.

89-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

90-Dhonde H.B., Mo Y.L., et Hsu T.T.C et Vogel. J (2007) “Fresh and Hardened Properties of Self-Consolidating Fiber-Reinforced Concrete” ACI Materials Journal, V. 104, No. 5, pp. 491-500.

91-Groth P., (2000b) “Steel Fibre Reinforced SCC, Final report of task 6”, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc.

92-Petersson, Ö., (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

93-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.

94- MARTINIE Laetitia(Comportement rhéologique et mise en œuvre des matériaux cimentaires fibrées) these doctotat de l' universite de paris-est- 13 Decembre 2010

95- R.N. Swamy et P.S. Mangat : Inuence of _bre-aggregate interaction on some properties of steel _bre reinforced concrete. Materials and Structures, 7(41):307{314, 1974.

96- S. Gr • unewald : Performance-based design of self-compacting _bre reinforced concrete. These de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2004

97-A.G. Kooiman : Modelling steel _ber reinforced concrete for structural design. Th_ese de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2000.

98- I.Markovic : High-performance hybrid-_bre concrete : development and utilisation. Thèse de doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2006

99- V. K. Bui, M.R. Geiker et S.P. Shah : Rheology of _ber-reinforced cementitious materials. Michigan, 2003. 4th Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement

Composites (HPFRCC4), RILEM publications.

100- B.P. Hughes et N.I. Fattuhi : The workability of steel-_ber reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 28(9):157{161, 1976.

101- C.D. Johnston : Proportioning, mixing and placement of _ber-reinforced cements and concretes. In D.J. Cleland (Eds.) in P.J.M. Bartos, D.L. Marris, _editeur : Production

Methods and Workability of Concrete, pages 155{179. RILEM Symposium, E and FN

Spon, London, 1996

102- R. Narayanan et A.S. Kareem-Palanjian : Factors influencing the workability of steel-fibre reinforced concrete - part I. Concrete, (45-48), 1982.

103-R. Narayanan et A.S. Kareem-Palanjian : Factors influencing the workability of steel-fibre reinforced concrete - part II. Concrete, (42-44), 1983.

104- M.Z. Bayasi et P. Soroushian : Effect of steel fibre reinforcement of fresh mix properties of concrete. ACI Material Journal, 89(4):369-374, 1992.

105-Alcantara M., Béton auto-plaçant et fibrages hybrides: composition, rhéologie et comportement mécanique, Thèse doctorat LMDC. (2004)

106-Alcantara M., Mouret. M., Pons. G., Granju.J-L., (2005) "Self-compacting concrete with hybrid fiber reinforcement: workability and mechanical behaviour", 4 th International

Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Chicago, USA.

107-Granju J-L., Sabathier V., Alcantara M., Pons G., Mouret M., "Hybrid fibre

reinforcement of ordinary or self-compacting concrete", In: Proceedings PRO 39 of the Sixth International RILEM Symposium BEFIB, RILEM Publications, pp 1311-1320. (2004)

108-Pons G., Mouret M., Alcantara M., Granju J.L., "Mechanical behaviour of selfcompacting concrete with hybrid fibre reinforcement", Materials and structures,

vol. 40, no2, pp. 201-210. (2007)

109-Houari H. « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon 1993, 244p.

110- GUILLAUME CAMPS Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton these doctorat de l'université de toulouse soutenue le 10 Septembre 2008

111- Rossi P Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p. . (1998)

112-Chanvillard G. (1993) Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, OA12.

113- Andra (2005) Les matériaux cimentaires. Référentiel matériaux, tome 3, Rapport Andra

114- BENTALHA née malou malika influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice caractérisation - comportement monotone - microstructure cimentaire these de doctorat d'état université mentouri-constantine 30 OCTOBRE 2007

115-DE LARRARD F. et LE ROY R <<Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances>> matériaux et construction 25, pp.464-475,1992

116-Casanova P., "Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure", LCPC. (1996)

117-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.

- 118-Cotterell B., ai Y.W., (1996) "Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie Academic & Professional", London/Chapman and Hall. p. 294.
- 119-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.
- 120-Deng Z., Li J., (2007) "Tension and impact behaviors of new type fiber reinforced concrete" Computers and Concrete, Vol. 4, No.1, 19-31.
- 121-Li Z., Li F., Chang T-Y.P., Mai Y-W., (1998) "Uniaxial tensile behavior of concrete reinforced with randomly distributed short fibers". ACI Materials Journal, V.95, No.5, pp. 564-573
- 122-Shah P.S., (1991) "Do fibers increase the tensile strength of cement-based matrixes?" ACI Materials Journal, V.88, No.6, pp. 595-602.
- 123-Cusens A.R., (1956) "The measurement of the workability of dry concrete mixes", Magazine of Concrete Research, Vol 8, N° 22, pp 23-30.
- 124-Johnston C.D., (2001)"Fiber-Reinforced Cements and Concretes", Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 368 pages ISBN: 9056996940
- 125-Yun H.D., Yang I.S., Kim S.W., Jeon E., Choi C.S., Fukuyama H (2007) "Mechanical properties of high-performance hybrid-fibre-reinforced cementitious composites (HPHFRCCs)" Magazine of Concrete Research, 59, No. 4, May 2007, pp.257-271.
- 126-Löfgren I., (2005) "Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.
- 127-Soroushian P., Lee C.D., (1990) "Distribution and orientation of fibres in steel fiber reinforced concrete", ACI Materials Journal, Vol.87, No. 5, pp. 433-439.
- 128-Kameswara Rao, C.V.S., (1979) "Effectiveness of random fibres in composites", Cement and Concrete Research, 9, 1979, pp. 685-693.
- 129-Swamy R. N., Al-Ta'an S. A., (1981) "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete", ACI Journal proceeding, V.78, N° .5, pp. 395-405
- 130-Kooiman, A.G., (2000) "Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design, PhD-thesis, Department of Structural and Building Engineering, Delft University of Technology
- 131-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, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
- 132-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, November 2003
- 133-Li V.C., Leun G.C.K.Y., (1992) "Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites", journal of engineering mechanics, ASCE, 118 (11), 2246-2264.

- 134-Fariborz M., Soleimani S.M., Banthia N., (2006) "Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix" Canadian journal of civil engineering, vol. 33, no6, pp. 726-734
- 135-Rossi P., (1991) "Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques", Annales de l'ITBTP, N° 492, série béton 279, 1991, pp.90-107.
- 136-Rachid berbaoui (identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère) thèse de doctorat de l'université du maine Soutenue le 21 janvier 2010
137. Bernard O., 2000. "Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents." Thèse de Doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse
138. Miner M.A., 1945. "Cumulative damage in fatigue." Journal of Applied mechanics, vol 67, pp.159-164.
139. Wang J., 1994. "Stress distribution of an inclined semi-infinite crack terminating at interface between dissimilar materials". 8th International Conference on Fracture, Kiev, pp. 102-109.
140. Raithby K.D., Sterling A.B., 1972. "Some effects of loading history on the fatigue performance of rolled asphalt." TRRL Report L.R., Royaume uni, 496p.
141. Di Benedetto H., Ashayer Soltani M.A., 1995. "Etude de la fatigue des mélanges bitumineux." 2ème réunion du réseau de laboratoires Géomatériaux, Environnement, Ouvrage, Aussois France, pp 1-3.
142. Said S., 1991. "Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures." Rapport de recherche. Suède: Statens Väg-Och Trafikinstitut, 67 p.
143. Alliche A., Francois D., 1992. "Damage of concrete in fatigue." Journal Eng Mech, vol.118(11), pp. 2176–2190.
144. Alliche A., 2004. "Damage model for fatigue loading of concrete." International Journal of Fatigue, vol. 26 (9), pp. 915-921
145. Suaris W., Ouyang C., Fernando V.M., 1990. "Damage model for cyclic loading of concrete." Journal of engineering mechanics, vol. 116 (5), p. 1020-1035.
- 146-Markovic I., Walraven J.C., Van Mier J.G.M., (2003) "Self-compacting hybrid-fibre concrete mix design", workability and mechanical properties, 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.
- 147-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.

ANNEXE

Notice technique
Edition juillet 2008
Numéro 1.97
Version n°080.2008
SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN

SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN

Fibres métalliques pour le renforcement des bétons.

Présentation Les fibres SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé. Elles sont encolées en plaquettes pour assurer une bonne répartition dans le béton.
Elles sont présentées en sac papier de 10 kg ou en chapelets de 250g.

Domaines d'application

- Bétons de dallage industriels.
- Dalles de compression pour planchers à poutrelles.
- Bétons préfabriqués (voussoirs, chambres EDF et TELECOM, caveaux, panneaux de façade, etc).
- Bétons autoplaçants.
- Fondations superficielles par semelle filante
- Dalles sur terre-plein

Caractères généraux Grâce à la nature de l'acier qui les constitue et au système d'ancrage mécanique dont elles sont dotées aux extrémités, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN présentent des caractéristiques de grande résistance à l'arrachement et à la traction.

Incorporées dans les bétons, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN leur confèrent les propriétés suivantes :

- ductilité grâce à la capacité des matériaux à se déformer pour des efforts élevés sans diminution significative de la résistance,
- ténacité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'absorption d'énergie nécessaire à la rupture,
- accroissement de la résistance à la fatigue et aux chocs,
- contrôle de la fissuration grâce à la reprise des contraintes qui permet de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation.

Les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN, utilisées dans les bétons de dalles de compression, de semelles filantes ou dalle sur terre-plein, remplacent le treillis soudé lorsque le rôle attendu de celui-ci est la répartition des fissures de retrait du béton.

Nota : l'utilisation des SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN se limite aux utilisations courantes, hors sollicitations dynamiques et charges lourdes concentrées.

Caractéristiques

Nature	Fil d'acier tréfilé sans revêtement
Longueur	50 mm
Diamètre	0,62 mm
Elancement	81
Nombre de fibres	8168 fibres/kg
Résistance en traction	1100 MPa (sur fil)
Longueur réseau	4084 m pour 10kg/m3 de fibres

Sika®

Résistance	Les caractéristiques de résistance équivalente en flexion, au cisaillement et en traction axiale du béton dépendent du dosage de fibres et de la classe de résistance du béton.
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sacs papier de 10 kg ■ palette de 60 sacs (600 kg) ■ Chapelets de 250g (Big Bag de 800KG- 3200 chapetets de 250Gg)
Stockage	Ne pas gerber les palettes.
Conservation	Protéger les palettes de la pluie.
Conditions d'application	
Dosage	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pour les fondations superficielles par semelle filante, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN bénéficient d'un avis technique CSTB n° 01/04 - 809 pour un dosage de 10 kg/m³ de béton. ■ Pour les dalles de compression, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN bénéficient d'un avis technique CSTB n° 03/05 - 439 pour un dosage de 10 kg/m³ de béton. ■ Pour les dalles sur terre-plein, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN bénéficient d'un avis technique CSTB n° 03/06 - 461 pour un dosage de 10 kg/m³ de béton. ■ Pour les applications de renforcement du béton dans les ouvrages en béton autoplaçant, les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN sont employées au dosage minimum de 10 kg/m³.
Mise en oeuvre	<p>Il est recommandé d'ajouter les SIKA® METAL FIBRES RC-80/50-BN directement dans le malaxeur de la centrale à béton, simultanément au sable et au gravillon dans la bascule à granulats.</p> <p>Ne pas introduire les fibres en premier et ne pas jeter les sacs en papier dans le malaxeur.</p> <p>Malaxer le mélange (béton + fibres) pendant 20 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 75 secondes.</p>
Précautions d'emploi	<p>Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants.</p> <p>Consulter la fiche de données de sécurité.</p>
Mentions légales	<p>Produit réservé à un usage strictement professionnel</p> <p>Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.</p> <p>«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.»</p>

Sika®

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@sikaeldjazair.com



MEDAFLOW 30

Conforme à la norme EN 934-2

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 30** est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le **MEDAFLOW 30** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le **MEDAFLOW 30** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

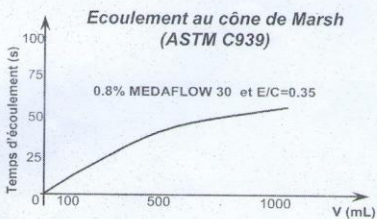
- Forme Liquide
- Couleur Jaunâtre
- pH 6 – 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 30%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 30** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton



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.



60

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz



Superplastifiant – Haut réducteur d'eau

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62.2

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0,5 à 1,850 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 30** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

MEDAFLOW 30

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 30** est conditionné en bidons de 10Kg, et en fûts de 210 Kg et 240 Kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex.dz

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2005.

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.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

