

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	11
------------------------------	-----------

CHPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION	17
I-1 Le béton autoplaçant en tant que matériau	18
I-2 Formulation et caractéristion	19
I-2-1 Essais de caractérisation	19
a – Essai d'étalement	19
b – Essai de la boîte en L	20
c – Essai de stabilité au tamis	21
I-2-2 Composition du béton autoplaçant	23
a- Les granulats	23
b- Les fines	24
c – Les superplastifiants	24
d- Les agents de viscosité	25
I-2-3 Méthodes de formulation	26
a – Méthode Japonaise	27
b – Méthode suédoise	29
c – Méthode Française	29
d – Autres méthodes	30
I-2-4 Exemples de formulation	30
I- 3 Comportement à l'état durci	31
I-3-1 Performances mécaniques du béton autoplaçant	31
I-3-2 Le Retrait	33
I-4 Exemples de réalisations	35

CHAPITRE II : SYNTHESE SUR LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

II-1 Particularités	39
II-2 Conditions Optimales de Fonctionnement des Fibres	39
II-2-1 Mécanisme de fonctionnement du couple béton – fibre	40

II-2-2 Rôle des fibres dans le béton	40
II-3 Propriétés et comportement du béton fibré dans les structures	42
II-3-1 Propriétés mécaniques	42
II -3-1-1 Sollicitation de compression	42
II -3-1-2 Comportement en traction	44
II -3-1-3 Comportement en flexion	44
II -3-1-4 Sollicitations de cisaillement	48
II-3-1-5 Comportement cyclique et dynamique	48
II- 3-2 Comportement différé : fluage et retrait	49
II- 3-3 Influence des fibres sur l’ouvrabilité	50
II-3-4 Influence de la teneur en fibres sur la composition de bétons autoplaçants	51
II-4 Intérêt des bétons autoplaçants fibrés durcis	53
II-5 Rhéologie des bétons autoplaçants à l’état frais	53
 CHAPITRE III : OPTIMISATION DES COMPOSITIONS	
III-1 Procédure et Stratégie Expérimentale	58
III-1-1 Formuler un béton	58
III-1-2 Pratique actuelle de la formulation des bétons autoplaçants	59
a – Méthode basée sur l’optimisation du squelette granulaire	60
b- Méthode basée sur un plan d’expérience	61
III-1-3 Les matériaux utilisés	61
a – Les Granulats	61
b- Les Addition minérale	62
c- Les Ciments	65
d- Les Adjuvants	65
III-1-4 Les fibres	66
III-2 Présentation de la démarche de formulation	68
III-2-1 Cahier de charges	68
III-2-1-1 Essais de caractérisation à l’état frais	69
a- Essai d’étalement au cône d’Abrams (Slump Flow) : milieu non confiné	69
b- Essai de la boîte en L (L-BOX)	70
c- Essai d’étalement modifié (J-Ring)	71
III-3 Principales étapes d’optimisation des bétons autoplaçants à fibrage mixte	72

III-4 Compositions optimisées	73
-------------------------------	----

III-5 Fabrications des bétons- Séquence de malaxage- Conservation des éprouvettes	74
---	----

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS ET BETONS AUTOPLACANTS FIBRE

IV-1 Dispositifs expérimentaux	76
IV-2 Comportement en Compression Simple	76
IV-2-1 Introduction	76
IV-2-2 Résistance et Module d'élasticité en Compression	77
IV-2-2-1 Dispositif expérimental et spécimens étudiés	77
IV-2-2-2 Résultats et discussions	77
a- Bétons autoplaçants avec fibres métalliques	77
b- Bétons autoplaçants avec fibres synthétiques	79
IV-3 Comportement en traction simple	81
IV-3-1 Introduction	81
IV-4 Comportement en flexion	87
IV-4-1 Introduction	87
IV-4-2 Essais de flexion 03 points	87
IV-4-2-1 Dispositif expérimental	87
IV-4-2-2 Mesure des paramètres à la rupture	88
IV-5 Expression des résultats	90
IV-5-1 Equivalence entre c_{mod} et flèche	90
IV-5-2 Limite de proportionnalité	91
IV-5-3 Résistance résiduelle à la traction par flexion	92
IV-5-4 Résultats et discussions	93
IV-5-4-1 Résultats pour les bétons autoplaçants mono fibré	93
IV-5-4-1-1 Bétons autoplaçants avec fibres métalliques	93
a- Courbes « Force-CMOD »	93
b- Observation de la fissuration	97
IV-5-4-1-2 Bétons autoplaçants avec fibres synthétiques	99
a- Courbes « Force-CMOD »	99

b- Observation de la fissuration	103
IV-5-4-2 Bétons autoplaçants à fibrage hybride (mixte)	103
IV-5-4-2-1 Différents facteurs intervenants dans le comportement mécanique des bétons autoplaçants fibrés	103
IV-5-4-2-1-1 Influence du pourcentage des fibres, effets de groupe positif et négatif, seuils d'efficacité et de saturation, et domaine d'efficacité	103
IV-5-4-2-1-2 Influence du pourcentage de fibres sur la résistance des bétons autoplaçants à fibrage mixte	105
IV-5-4-2-1-3 Relation entre type, dimensions et caractéristiques mécaniques d'une fibre, et compacité de la matrice	107
IV-5-4-2-2 Résultats et discussions	109
IV-5-4-2-2-1 Courbes « Effort-Cmod »	109
a- Différents dosages en fibres métalliques avec $4,5 \text{ Kg/m}^3$	109
b- Différents dosages en fibres métalliques avec 9 Kg/m^3	115
IV-6 Contraintes résiduelles	121
IV-7 Approche énergétique	124
IV-7-1 Cas des bétons autoplaçants avec fibres métalliques	126
IV-7-2 Cas des bétons autoplaçants avec fibres synthétiques	128
IV-7-3 Cas des bétons autoplaçants avec fibrage mixte	129
a- Dosage en fibres métalliques variable et synthétique constant et égal à $4,5 \text{ Kg/m}^3$	129
b- Dosage en fibres métalliques variables et synthétique constant et égal à 9 kg/m^3	130
IV-7-4 Récapitulatif	131
CHAPITRE V : VARIATIONS DIMENSIONELLES ET PONDERALE RETRAIT ET PERTE DE MASSE	
V-1 Introduction	134
V-2 Les différents formes de retrait après prise	135
a- Les mécanismes de l'hydratation	136
b- Le déroulement de l'hydratation	136
c- Nature des déformations libres du béton autoplaçant	137

V-3 Effets de la formulation sur la fissurabilité	139
V-3-1 Données expérimentales	139
V-3-2 Apport des fibres	142
V-3-3 Apport de la réglementation	142
V-4 Retrait à l'état durci	142
V-4-1 Dispositif expérimental	143
V-4-2 Retrait total	144
V-5 Discussions des résultats	147
V-6 Variations pondérales (perte de masse)	148
V-7 Sensibilité à la fissuration de retrait empêché	150
V-7-1 Dispositif expérimental	150
V-7-2 Résultats et discussions	153
V-7-3 Conclusion	157
CHAP VI : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES POSSIBLES	160
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	165

INTRODUCTION GENERALE

Le béton, matériau par excellence plus que centenaire, subit des incessantes évolutions tant dans l'amélioration de ses performances intrinsèques que dans ses utilisations en association avec d'autres matériaux qui lui confèrent d'autres propriétés.

Dans un premier temps les chercheurs se sont focalisés sur l'augmentation des résistances en compression car c'était le paramètre atout majeur du béton.

Ainsi, au milieu du 20^{ème} siècle la résistance moyenne en compression à 28 jours tournait autour de 25 Mpa. Le premier règlement aux états limites français, le BAEL 1980 envisageait des bétons allant jusqu'à des résistances de 40 Mpa. Dans son édition suivante, celle de 1991 celle-ci était étendue à 60 Mpa. Dans la dernière édition, celle de 1999 elle est portée à 80 Mpa.

Parallèlement à la notion de Béton à Haute Résistance se substituait la notion de Bétons à Hautes Performances. Ainsi ses performances en durabilité, en comportement différé, retrait, fluage, ont pu être améliorées.

Une seule caractéristique résistait à l'amélioration globale du matériau, c'était celle de la résistance en traction. Ainsi pour des bétons de résistance en compression jusqu'à 40Mpa, on admet que la résistance en traction varie linéairement en fonction de celle en compression. Pour les bétons de résistance supérieure, elle est une fonction puissance d'exposant inférieur à 1. Les progrès obtenus en traction n'allaient donc pas de pair avec le comportement en compression.

De plus, non seulement, la résistance en traction n'augmentait pas aussi vite que les autres performances mais encore le matériau amélioré présentait une fragilité accrue en traction.

Il a alors été envisagé de rajouter d'autres éléments dans le composite multiphasique qu'est le béton, des éléments de la même échelle que les granulats : des fibres métalliques ou synthétiques dont le but devait être d'améliorer ce mauvais comportement du béton tendu.

Ces améliorations devraient permettre, à terme, de supprimer le ferrailage du type « Béton armé » des pièces faiblement sollicitées en traction ou de reprendre des efforts secondaires sans l'ajout d'armatures complémentaires.

Indépendamment de ces améliorations du comportement mécanique des bétons, on assiste à l'heure actuelle, à des modifications du matériau béton visant à faciliter sa mise en œuvre tant pour des raisons constructives (meilleure mise en place dans le cas de ferrailages complexes) que de pénibilité de travail : La vibration nécessaire à la mise en place du béton classique est cause de pénibilité pour l'ouvrier et de nuisances sonores pour l'environnement du chantier ou du banc de préfabrication. On assiste ainsi au développement des bétons dits de « nouvelle génération » que sont les **Bétons Autoplaçants**. A l'origine il y'a une dizaine d'année, ceux-ci trouvaient plutôt leur application dans la réalisation d'ouvrages d'arts exceptionnels et donc concernaient des bétons à haute et très haute résistance. Les volumes mis en œuvre étant relativement faibles. La tendance actuelle en France est d'utiliser de plus en plus ces Bétons Autoplaçants, que nous noterons par la suite en abrégé BAP, dans les bâtiments et plus particulièrement dans les planchers et dans les voiles verticaux, une telle utilisation augmente nettement les volumes mis en œuvre.

Dans un premier temps intéressons-nous aux recherches actuelles sur les Bétons Autoplaçants, et on constate qu'un des principaux points critiques est également le comportement rhéologique lors de la mise en place. La maîtrise de ce comportement pose des problèmes pointus de composition car il faut jouer sur des paramètres antinomiques de viscosité et de fluidité pour éviter les écueils que sont soit la ségrégation des granulats soit le blocage du béton dans les grilles d'armatures.

En fonction de ces différentes tendances de recherche récentes sur les bétons, une problématique de recherche innovante et intéressant certains industriels, notamment dans la préfabrication est apparue.

On s'intéresse dans un deuxième temps aux apports de la recherche sur l'influence des fibres dans le béton. On peut distinguer, en fonction de leur influence sur le comportement mécanique du composite, deux grandes familles de fibres. Les fibres adhérentes et/ou courtes qui confèrent au matériau béton une résistance apparente en traction améliorée, en agissant sur les micro-fissures et les fibres longues et glissantes qui, elles, vont ponter les macro-fissures donc diminuer la fragilité du matériau sans augmenter notablement la résistance apparente en traction. Ces deux types de fibres ont donc des effets complémentaires. Ces

apports positifs peuvent être contrecarrés par les conditions de mise en place du béton qui peuvent –être grandement détériorés par la présence des fibres notamment lorsqu’elles ont un élanement important. Le comportement rhéologique du mélange composite bétons-fibres est un paramètre très important pour l’efficacité du résultat obtenu.

Tout d’abord qu’apporterait l’association, dans une même matrice cimentaire, des deux familles de fibres précédemment citées. Y aurait-il une synergie des phénomènes positifs, une additivité pure et simple ou, au contraire, une neutralisation des effets bénéfiques ?

Cette association hybride à différents dosages, pourrait être mise en œuvre dans le cas de bétons vibrés de manière classique mais aussi une tendance actuelle vers les Bétons Autoplaçants et de là une mise en évidence d’éventuels dosages seuils.

C’est dans cette problématique et dans cette perspective que nous allons orienter notre travail.

Les problèmes que nous allons rencontrer sont donc, tout d’abord, principalement de composition pour optimiser le comportement du béton frais puisque d’une part, les fibres perturbent la mise en place de la matrice cimentaire même dans le cas des bétons vibrés de manière conventionnelle et, d’autres parts, dans le cas des BAP les problèmes de mise en œuvre sont déjà délicats à résoudre même en l’absence de fibres.

Une fois les compositions optimisées, il serait bon de pouvoir quantifier l’ouvrabilité de nos bétons à partir de paramètres rhéologiques moins subjectifs que les tests d’ouvrabilité classiques recommandés pour les BAP.

Et dans le but de mettre en évidence l’apport des mélanges de fibres sur le comportement mécanique des bétons, il nous faudra mettre en œuvre différents tests de compression, de traction, de flexion pouvant illustrer les gains ou les pertes de résistance, de ductilité, d’énergies de rupture des bétons avec fibrage hybride (bi-fibré). A cela s’ajoute les paramètres physiques : tels que : module d’élasticité longitudinale E , le coefficient de poisson ν .

Et enfin des essais de résistance à la fissuration de retrait total et de retrait empêché à l’anneau seront abordés.

Afin d'exploiter d'une façon rationnelle, le plan de travail prédéfini, nous avons adopté la démarche suivante :

Dans **le premier chapitre** nous présenterons une synthèse des connaissances actuelles sur les Bétons Autoplaçants en mettant en évidence les méthodes de formulations existantes, leurs propriétés rhéologiques et mécaniques.

Et comme indiqué précédemment, nous devions réaliser des bétons fibrés, avec des fibres métalliques de fonte amorphe adhérentes (à différents dosages), et des fibres synthétiques polymériques glissantes (à différents dosages), et bien évidemment avec des mélanges hybrides combinés. Dans **le deuxième chapitre**, nous présenterons donc l'étude de l'optimisation de ces bétons en vue de satisfaire à la fois un bon comportement rhéologique du béton frais, mis en évidence par les tests d'ouvrabilité recommandés, et un bon comportement mécanique du béton durci à partir des caractéristiques de base que sont les résistances en compression et en traction. Dans tout les cas nous avons composé, comme référence un BAP non fibré. Les mesures des modules d'élasticité et des coefficients de poisson seront aussi abordées.

Les tests d'ouvrabilité utilisés précédemment pour l'optimisation de nos compositions ne nous paraissant pas suffisamment objectifs, nous avons essayé de les relier à des paramètres rhéologiques qui, sans être intrinsèques, nous paraissait plus quantifiable. C'est l'objet du **chapitre 3** dans lequel nous associons les tests d'ouvrabilité menés sur chacune des compositions des BAP fibrés avec des mesures rhéométriques.

La validation de nos compositions optimisées sera justifiée au chapitre 4 à partir des résultats basiques de résistance en traction et en compression. L'apport positif du fibrage hybride dans le comportement du béton ne peut être clairement mis en évidence qu'en s'intéressant aux lois de comportement **effort-déformation** (ouverture de fissure) enregistrées lors d'un essai à la rupture en déformation contrôlée permettant de mettre en évidence l'énergie potentielle de rupture mise en action ou dissipée par le matériau testé. Ainsi **le chapitre 4** est consacré aux résultats expérimentaux d'essais de flexion 03 points sur des éprouvettes normalisées conformément aux normes CEN de Novembre 2005 afin de mettre en évidence les contraintes résiduelles.

Et enfin **le chapitre 5** est consacré à la résistance à la fissuration de retrait (essais de retrait empêché à l'anneau) de nos différentes compositions de béton mono et bi-fibrés.

Nous tirerons ensuite les conclusions de ce travail et ses perspectives pour l'avenir sachant pertinemment que, compte tenu de l'étendue du sujet, nous nous pourrions apporter qu'une réponse partielle aux problématiques complexe de ce sujet.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION :

HISTORIQUE ET DEVELOPPEMENT :

Le concept des bétons autoplaçants (BAP) a été créé et développé par des chercheurs japonais vers la fin des années 80 à partir de la mise au point de nouveaux adjuvants organiques.

En Europe et en France en particulier, l'intérêt pour ces bétons est apparu seulement vers la fin des années 90 aussi bien dans le domaine du béton prêt à l'emploi (BPE) que dans celui de la préfabrication. Ces bétons très fluides, mis en place sans vibration même dans les structures complexes et fortement ferraiillées, présentent de nombreux avantages :

- Diminution du bruit ;
- Diminution de la pénibilité du travail ;
- Augmentation des cadences de coulage ;
- Meilleur état fini des parements ;

Toutefois, comme pour tout nouveau matériau, il est nécessaire de connaître les spécificités des bétons autoplaçants BAP (ou bétons autonivelants (BAN) utilisés pour les dallages).

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse bibliographique sur le béton autoplaçant en tant que matériau. Et toujours dans le même contexte (bibliographie), nous analyserons ensuite dans le 2ème chapitre, l'influence des fibres sur les paramètres assurant le caractère autoplaçant et leurs adhérence avec le béton.

Le troisième chapitre sera consacré à la formulation des bétons autoplaçants et bétons autoplaçants fibrés.

La Synthèse de cette étude nous conduira à étudier les caractéristiques à l'état frais (mobilité dans différents milieux : confiné et libre), ensuite le comportement à l'état durci, (compression, traction par fendage et flexion), et à la lumière de ces essais de caractérisation, dégager un mélange seuil, à partir duquel un intérêt certain commence à se mettre en évidence sur le plan réponse mécanique. Les résistances résiduelles et leur palier de ductilité, ainsi que les approches énergétiques seront aussi abordées dans cette étude et on termine avec les variations dimensionnelles (retrait et perte de masse).

I – LE BETON AUTOPLACANT EN TANT QUE MATERIAU :

I-1 Introduction :

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

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

OZAWA et al [1] ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton. Pour des valeurs d'affaissements plus élevées au contraire, les granulats peuvent se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation de ponts de granulats reposant sur les obstacles : c'est la ségrégation.

Pour avoir une capacité de remplissage maximale, il faut donc avoir une déformabilité maximale et une ségrégation minimale. La figure I-1 montre la relation entre les différentes caractéristiques du béton autoplaçant.

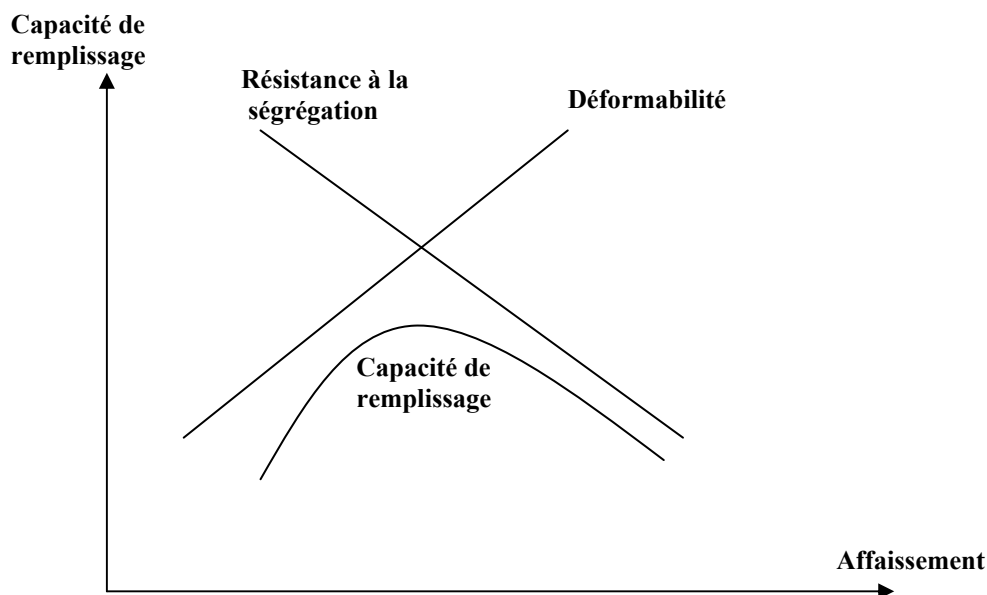


Figure I-1 : Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement d'un béton

Le même auteur [1] a montré que la déformabilité du béton était uniquement fonction de l'eau libre, eau non retenue, chimiquement ou physiquement, par les particules fines (ciments ou ajouts minéraux) ou le sable.

La résistance à la ségrégation dépend essentiellement de deux facteurs : la viscosité du mortier (ou de la pâte de ciment) et du volume des gros granulats [2]. En effet, Umehara et al [3] montrent qu'une diminution de la viscosité du béton s'accompagne d'une augmentation de la ségrégation. L'entraînement des granulats par le mortier est favorisé par les forces de viscosité, une augmentation de la viscosité minimise donc la ségrégation. Le volume des gros granulats ainsi que leur taille maximale jouent un rôle non négligeable dans la résistance à la ségrégation. En effet, les collisions et les frictions intergranulaires, qui sont à l'origine du blocage de l'écoulement autour des obstacles, augmentent avec le volume des gros granulats dans le béton [1].

La composition des bétons autoplaçants doit donc inclure des constituants supplémentaires et des dosages différents par rapport à ce qui est pratiqué pour les bétons vibrés pour présenter ces qualités de déformabilité et de résistance à la ségrégation. Nous abordons dans le paragraphe suivant la composition et la formulation de ces bétons.

I-2 Formulation et caractérisation :

Contrairement au béton ordinaire, le béton autoplaçant présente une difficulté particulière pour sa formulation et sa caractérisation. En effet, il doit concilier deux propriétés, à priori contradictoires, à savoir la fluidité et l'absence de ségrégation et de ressuage. Il doit satisfaire à plusieurs tests pour pouvoir être qualifié d'autoplaçant.

I-2-1 Essais de caractérisation :

Avant d'accepter une composition comme celle d'un BAP, il faut s'assurer que le béton résultant possède effectivement les qualités qu'on espère. Pour cela, il existe de nombreux essais permettant d'évaluer les différentes caractéristiques du béton à l'état frais.

a) Essai d'étalement :

Cet essai est dérivé de l'essai d'affaissement. Au lieu de mesurer l'affaissement, qui doit toujours être supérieur à 25 cm pour le béton autoplaçant, on mesure le diamètre moyen de la galette formée par le béton lors de l'étalement. Cet essai permet d'avoir une très bonne idée de la déformabilité du béton autoplaçant. On vise habituellement un étalement compris entre 600 et 700 mm pour un béton autoplaçant et ceci conformément aux recommandations de l'AFGC 2000 [4]. Il faut cependant noter que cet essai donne seulement une idée de la déformabilité du mélange et qu'il faut donc compléter par un essai mesurant la résistance à la ségrégation ou la capacité de remplissage.

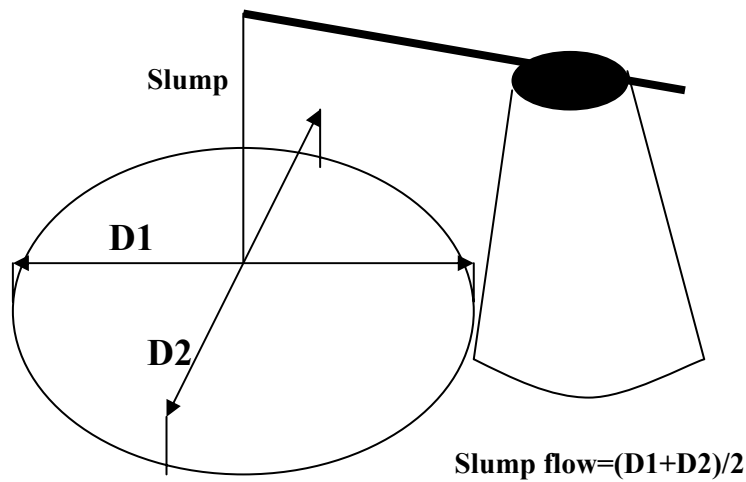


Figure I-2 : Essai d'étalement

b) Essai de la boîte en L :

Cet essai permet de tester la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables.

Le principe de l'essai est le suivant :

- La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton
- On laisse le béton reposer pendant une minute puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage
- Quand le béton s'arrête de s'écouler, on mesure les hauteurs H1 et H2

On vise un rapport H2/H1 d'au moins 0,8 pour un béton autoplacant selon les recommandations de l'AFGC 2000 [4].

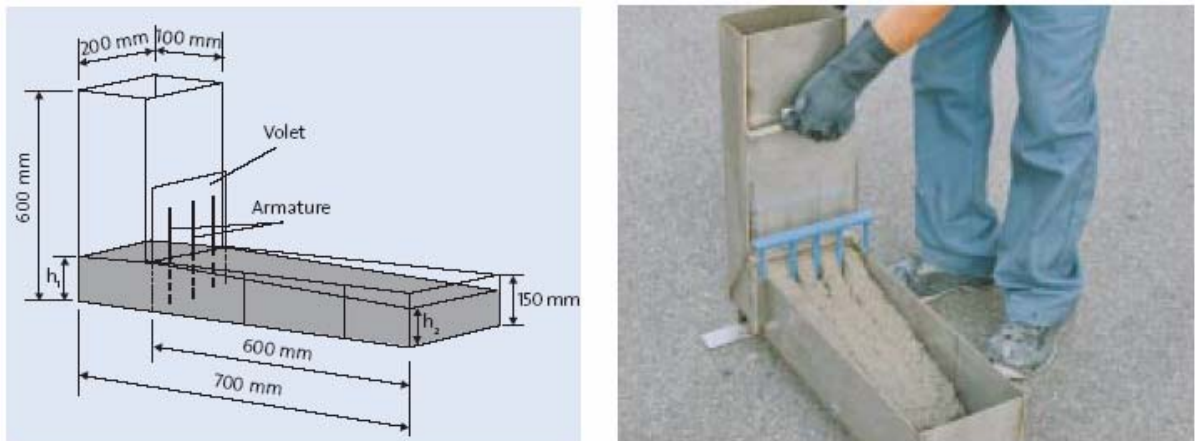


Figure I-3 : Essai de la boîte en L

Beaucoup d'autres essais similaires à celui de la boîte en L sont utilisés, partout dans le monde pour caractériser l'aptitude au remplissage du béton tel que : l'essai de la boîte, l'essai en U, l'essai de la capacité de remplissage etc. Ils relèvent du même principe.

c) Essai de stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Ils complètent les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné (boîte en L, en U, ...) ou non (étalement), en caractérisant la stabilité.

Cet essai consiste à déposer deux litres de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture. Après cinq minutes, 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 2 L, donne l'indice de ségrégation.

On vise un indice de ségrégation d'au plus 30 % pour un béton autoplaçant d'après l'AFGC 2000 [4].

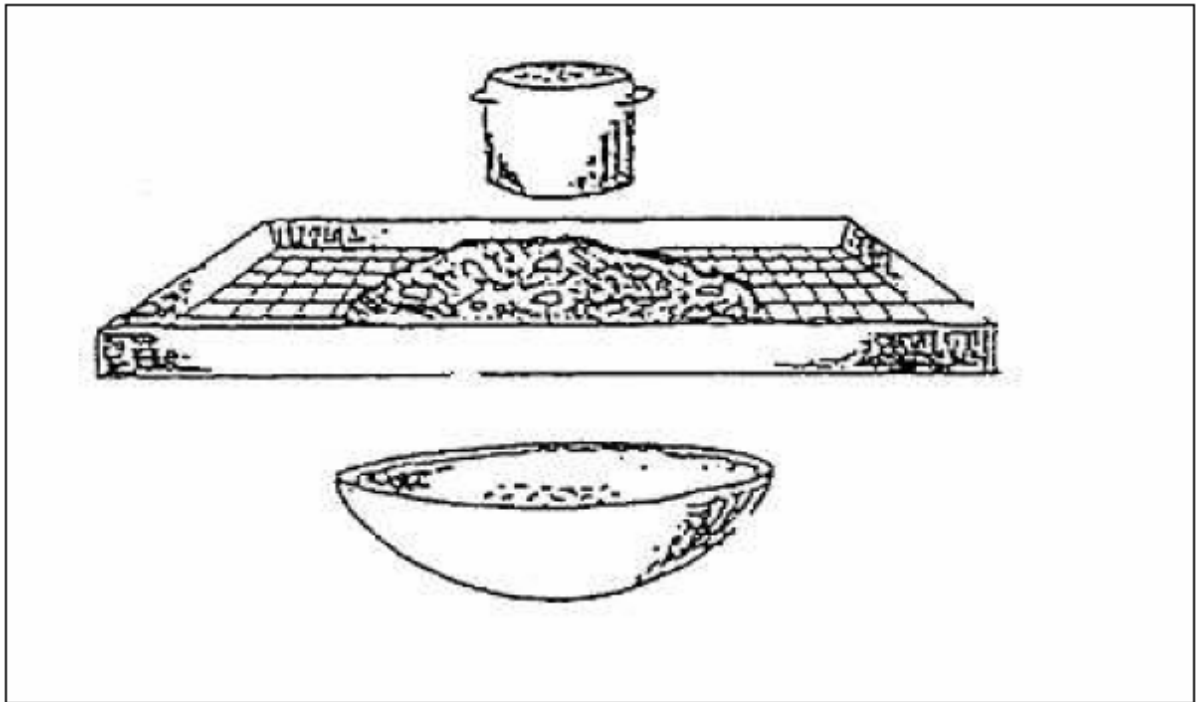


Figure I-4 : Essai de stabilité au tamis

D'autres tests de caractérisation ont été rencontrés dans la littérature. Parmi ces tests, on peut citer : essai de la colonne, essai de l'entonnoir, essais de comptage de granulats etc.

Tous les essais cités sont très sensibles au type de confinement (largeur de la maille des aciers, diamètre des tiges, géométrie etc.) par rapport au diamètre maximal des granulats et ne reflètent pas forcément les formes géométriques des structures réelles. Il faudrait, donc, distinguer pour la formulation des bétons autoplaçants entre deux types de structures.

- Structure courante (poutre, poteau, et planchers de bâtiment) : densité d'armatures faible et absence de formes complexes de coffrage, il faut avoir un béton qui s'écoule bien sans chercher à lui donner une grande résistance à la ségrégation puisque les risques de blocage sont réduits.
- Ouvrage d'arts (pont, barrage etc.) : coffrage très armés comme le montre la photo de la figure I-5, dans ce cas la fluidité n'est pas suffisante, il faut prévoir plus de pâte au détriment des gros granulats et s'assurer que le béton présente une déformabilité et une résistance à la ségrégation maximale.



Figure I-5: Exemple de ferrailage dense

I-2-2 Composition du béton autoplaçant :

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées des BAP. Les compositions tirées de la littérature, Sedran [5] soulignent deux particularités : Ces bétons contiennent un volume de fines plus important que les bétons classiques vibrés et souvent un agent de viscosité (les japonais utilisent également des forts dosages en superplastifiant). Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui sont proposés pour composer les bétons autoplaçants sont : Les granulats, les fines, le fluidifiant et l'agent de viscosité.

a) Les granulats :

Khayat [6] a pu mettre en évidence l'importance des gros granulats sur la fluidité des bétons autoplaçants, de même qu'il a recommandé d'utiliser des granulats roulés. En effet, les granulats roulés permettent de diminuer le risque de ségrégation. Sedran et al [5], considèrent que le volume des gros granulats (grain supérieur à 5 mm) dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet ils ont constaté que plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue.

Ces courbes montrent la très grande influence du volume de gros granulats sur le coefficient de remplissage contrairement au rapport sable sur pâte qui, lui, n'influence pas ce coefficient, comme le montre la courbe de la figure I-5. De plus les gravillons étant la cause de blocage en milieu confiné, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable est proche de 1 [5].

La taille maximale des granulats est, aussi un facteur non négligeable. En effet, plus la taille maximale des granulats augmente, plus le risque de blocage croît. Le tableau I-1 illustre l'influence du diamètre maximale D_{\max} du granulat sur la variation de passants obtenu par l'essai à la passoire (armature 16mm et la maille de 35 mm).

On remarquera que le risque de blocage est fonction aussi de l'espacement des armatures [1]. (Ceci confirme le fait qu'une formulation de béton doit dépendre de la structure).

D_{\max} (mm)	Etalement (cm)	% passant
20	72	28
16	70	35
14	74	91
12,5	69,5	100

Tableau I-1 : Sensibilité au D_{\max} de l'essai de la passoire

b) Les fines :

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage (par rapport au béton vibré).

Pour obtenir ces propriétés et pour un meilleur arrangement granulaire on ajoute de fortes teneurs en additions minérales : fumées de silice, laitiers, addition calcaires, cendres volantes..... (Environ 200 Kg/m³ de cendres volantes pour 300 Kg/m³ de ciment).

En effet la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. Ceci favorise à la fois une bonne stabilité et une bonne déformabilité du béton à l'état frais. D'autre part, les ajouts minéraux sont moins réactifs à court terme que le ciment, ce qui permet de disposer d'un temps prolongé d'ouvrabilité. Ils ont aussi pour effet de réduire la chaleur d'hydratation.

c) Les superplastifiants :

Les fluidifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplaçants est assurée par des dosages relativement importants en fluidifiants. La capacité de remplissage d'un BAP croît avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît. Selon Okamura et al [7] l'utilisation d'un superplastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection de bétons

autoplaçants. Certains fluidifiants comme le FPC (fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères de structures très complexes permettent d'atteindre des étalements de 250 mm sans ségrégation, ce qui n'est pas le cas avec PC (polymère de type polycarboxylate) et NC (naphtalène sulfonate) par exemple.

d) Les agents de viscosité :

Généralement les fluidifiants diminuent la viscosité du béton [6], ce qui rend le matériau plus sensible vis-à-vis du phénomène de ségrégation. Les agents de viscosité ont, eux, la propriété essentielle de modifier le comportement rhéologique des milieux aqueux, dans lesquels ils ont été utilisés (ce rôle modificateur peut aller du simple épaissement jusqu'à la gélification) et peuvent être utilisés avec intérêt dans la composition des BAP).

D'après Khayat [6], le mode d'action des agents de viscosité se fait par adsorption des molécules d'eau sur les longues chaînes de polymère (liaison hydrogène) induisant un gonflement du polymère qui augmente la viscosité de l'eau par conséquent celle de la pâte de ciment.

De Larrard [8] montre bien l'intérêt de l'utilisation d'un agent de viscosité. En effet, pour une même squelette granulaire, en combinant agent de viscosité et superplastifiant on améliore les propriétés du béton frais et on augmente de façon importante la résistance à la ségrégation et au ressuage, comme indiqué sur le graphe de la figure I-3.

Les expériences menées au LCPC [8], montrent que :

- Lorsque aucun agent de viscosité n'est employé, il faut environ 600kg/m^3 de fines (ciment + cendres ou calcaires) pour assurer une bonne rétention d'eau.
- Lorsqu'on introduit un agent de viscosité, on peut descendre ce dosage à 400 kg/m^3 voir 350 kg/m^3 si l'on utilise le produit (PR960SL) de Rhône-Poulenc.

D'autres types d'adjuvants sont, parfois utilisés tels que :

- Les agents entraîneurs d'air : ils contribuent à la stabilisation de l'air incorporé dans le béton au cours du malaxage. D'après Khayat [6], l'utilisation d'un agent de viscosité nécessite une grande quantité d'agent entraîneur d'air. Il avance deux raisons : La première est la diminution de la quantité d'eau libre laquelle est nécessaire à l'agent entraîneur d'air pour agir, la seconde est l'augmentation de la tension superficielle de l'eau qui contribue à augmenter la pression des bulles d'air et à les rendre moins stables.
- Les agents expansifs : Ils permettent au béton de contrer la réduction de volume lors de la prise en causant une faible augmentation de volume. En effet, les bétons autoplaçants

sont susceptibles d'avoir un retrait de séchage important puisqu'ils contiennent un volume de pâte important.

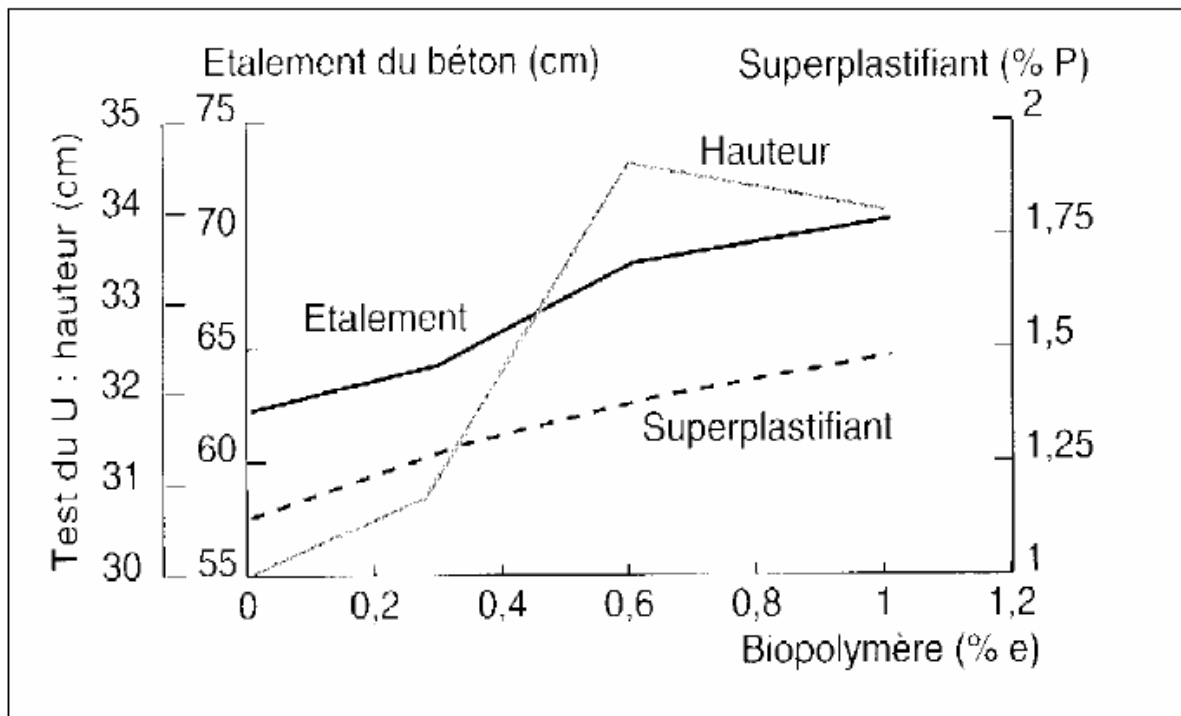


Figure I-6 : Propriétés du béton optimisé pour différentes teneurs en agent de viscosité

En conclusion, pour obtenir un béton autoplaçant, on doit ajouter plus de fines et moins de gros granulats afin d'avoir une meilleure déformabilité. Ce sont deux particularités indispensables. L'ajout de superplastifiant est aussi essentiel.

L'utilisation d'agents de viscosité ne semble pas primordiale, bien qu'ils facilitent la formulation des BAP et permet de diminuer nettement leur sensibilité à des variations de teneur en eau et de module de finesse de sable [5].

Pour une meilleure résistance à la ségrégation et pour réduire le tassement et le ressuage, on peut ajouter un agent de viscosité ou simplement réduire le rapport eau/liant [9].

I-2-3 : Méthodes de formulation :

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieu confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton

autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier de charges précis [5].

Nous allons passer en revue les différentes formulations rapportées par dans la littérature.

a) Méthode japonaise : proposée par Okamura et al [10].

Le principe de cette méthode est le suivant :

- La teneur volumique en gravillons du béton est fixée à 50% du volume du solide
- Le volume du sable est fixé à 40% du volume total du mortier
- L'Optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- L'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante (mesurée par le temps d'écoulement par l'entonnoir) et une fluidité importante (mesurée par l'étalement au cône).

Les auteurs définissent alors deux (2) grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement : la fluidité du mortier est donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{h}{h + y} \text{ avec } r_1 \text{ et } r_2 \text{ les diamètres d'étalement selon deux médianes}$$

La viscosité du mortier donnée par :

$$R_m = 10/t$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en s :

Pour obtenir un béton autoplaçant acceptable, il faut avoir simultanément :

$$\Gamma_m = 5$$

$$R_m = 1s^{-1}$$

Cette méthode est générale et simple. Il faut faire attention aux risques de blocages.

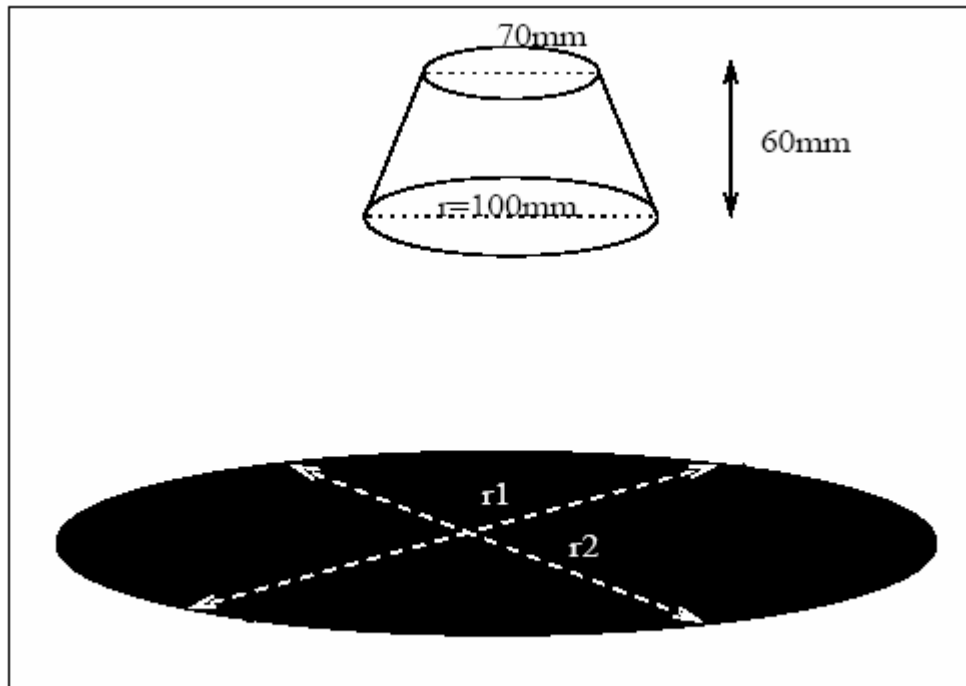


Figure I-7: Cône pour mesurer l'étalement des mortiers

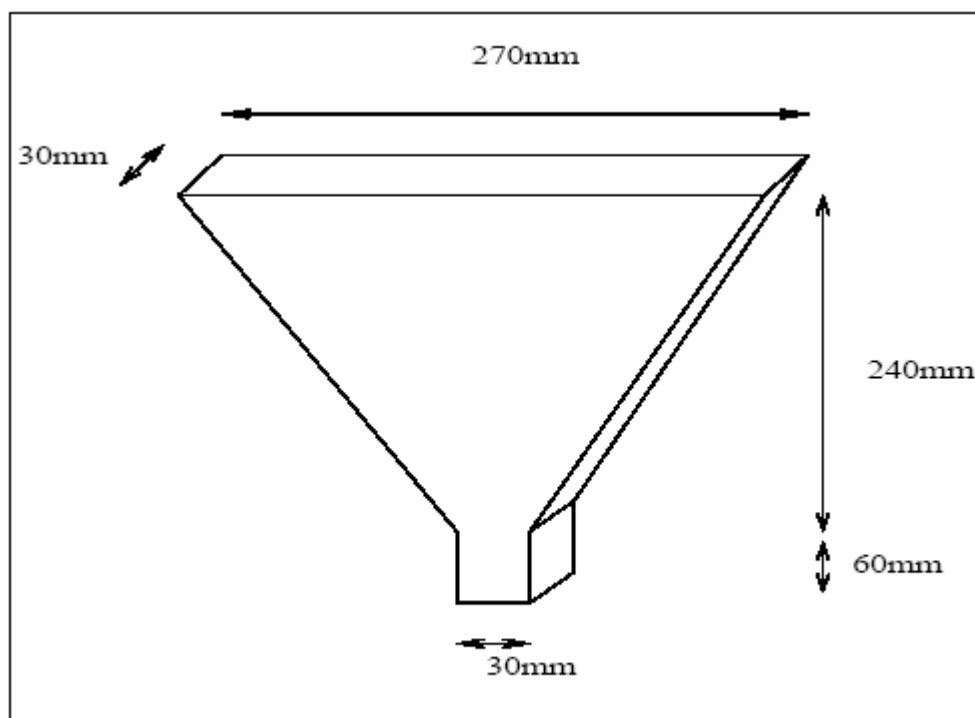


Figure I-8 : Entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers

b) Méthode suédoise :

La méthode suédoise est basée sur le principe de fluidité dans un milieu confiné. En fait ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégré dans le processus de formulation. Ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

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

c) Méthode Française (LCPC) : proposée par De Larrard et al [8]

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

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente

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

- ◆ La proportion du liant est fixée à priori (70% du 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 de 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 5.10^4 . La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats /phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

d) Autres Méthodes :

D'autres méthodes de formulation, que nous ne développerons pas dans cette étude bibliographique, ont été publiées tels que la méthode reposant sur la théorie de « l'excès de pâte » : proposée par Oh et al [11], cette méthode est simple à utiliser, elle étudie l'interaction entre les granulats et les particules fines du mortier frais.

I-2-4 : Exemples de Formulation :

Type	Ciment Kg/m ³	Laitier Kg/m ³	Cendres Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravillons Kg/m ³	Eau Kg/m ³	super- plastifiant	Agent viscosi
I	200	200	100	0	704	898	165	6	0
II	180	220	100	0	753	926	170	7.7	1.5
III	300	0	0	200	700	910	170	8	0.2

Tableau I-2 : Exemples de formulations japonaises

Gâchée	Ciment Kg/m ³	Filler Kg/m ³	Gravillons (10-14) Kg/m ³	Gravillons (5-12.5) Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Eau Kg/m ³	Super- plastifiant Kg/m ³
315	451	59	557	299	858	182.7	6.98
316	385	120	563	302	867	174.0	6.24
317	312	186	566	304	872	169.2	5.38
329	480	0	568	305	918	166.1	7.20
321	475	0	562	302	909	174.4	7.13
318	470	0	556	299	900	182.6	7.06

Tableau I-3 : Exemples de formulation françaises Sedran [5]

Gâchée	Ciment Kg/m	Fumée de silice Kg/m ³	Gravillons Kg /m ³	Sable Kg/m ³	Eau Kg/m ³	AV G/m ³	EA L/m ³	SP L/m ³
M35-SF	563	18	854	709	203	436	-	25.3
M35-A	581	-	835	682	203	436	1.0	23.2
M35-SF-A	563	18	825	680	203	436	1.0	25.3
M38-A	589	-	875	790	224	436	0.8	11.8
M38-SF-A	563	18	810	670	220	436	1.0	11.3
M41-SF	563	18	809	674	238	436	-	7.6
M41-SF-A	563	18	775	650	238	436	0.8	7.6

Tableau I-4 : Exemples de formulations canadienne d'après Beaupré [11]

Avec **AV** : agent de viscosité, **EA** : entraîneur d'air, et **SP** : superplastifiant

Nous retenons des tableaux ci-dessus, que toutes les formulations utilisent du superplastifiant, alors que l'agent de viscosité peut ne pas être incorporé.

I-3 : Comportement à l'état durci :

La littérature scientifique rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait des bétons autoplaçants.

I-3-1 : Performances mécaniques du béton autoplaçant :

La formulation des BAP implique un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques. Paultre et al [12] ont fait des tests comparant les bétons autoplaçants aux traditionnels BHP. Ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistance à la compression et le module d'élasticité) sur un BAP et un BHP à affaissement plus faible mais ayant une résistance mécanique égale. Les résistances en compression des BAP et des BHP sont comparables, par contre les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais consignés dans le tableau I-5

Résistance visée (Mpa)	60	60	80	80
Nature du béton	BHP	BAP	BHP	BAP
Ratio E/L	0.5	0.42	0.35	0.37
F _{c28} (Mpa)	54.1	60	71.9	80.9
Module d'élasticité (Gpa)	38	34.7	40.9	38.7

Tableau I-5 : Principales caractéristiques des bétons testés par Paultre et al [12]

En ce qui concerne la résistance à la compression et à la traction des BAP, Gibbs et al [13] ont fait des tests comparant les BAP aux bétons de référence, sur des éléments standards :

- Cubes de 150 mm, pour mesurer la résistance à la compression
- Des cylindres pour mesurer la résistance à la traction par fendage.

Le tableau I-6 présente les résultats obtenus en compression et en traction à 28 jours.

Résistance à 28 jours	BAP	Référence (BV)
Résistance à la compression (N/mm ²)	47.2	37.1
Résistance à la traction (N/mm ²)	3.4	2.4
Résistance à la traction/Résistance à la compression	0.072	0.065

Tableau I-6 : Résistance à 28 jours pour des éléments standards d'après Gibbs et al [13]

Les auteurs ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des bétons autoplaçants et des bétons vibrés.

Les travaux de Gibbs et al [13] ont, aussi, montré que la résistance à la compression à 7 jours est plus élevée pour les BAP que celle du béton vibré de référence, d'après l'auteur, en raison de la présence de poudre de calcaire qui accélère l'hydratation de C₃S et la résistance à la compression à jeune âge. Ce résultat est, également, observé par Cochet et al [14] qui a travaillé sur des bétons renfermant une quantité importante de fine de calcaire ; il ajoute que plus le filler est fin et plus le ciment contient du C₃A, plus la prise se fera rapidement.

Pour ce qui concerne la traction, Gibbs et al [13] ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence. Par contre Sonebi et

al [15] observe que la résistance à la traction à 28 jours pour les BAP (conservés dans l'eau) est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions. L'étude de Fukute et al, rapportée par Hu et al [16] montre que le rapport entre la résistance à la traction et à la compression est légèrement plus fort, en comparaison avec des bétons vibrés. Les modules élastiques à 28 jours sont, eux, plus faibles de quelques Gpa que ceux des bétons traditionnels de résistance équivalente. Ambroise et al [17] ont cherché à vérifier expérimentalement si la résistance pouvait être prédite soit par la loi de FERET, soit par celle proposée par DE LARRARD, qui tient compte d'ajouts dans la matrice cimentaire (les résistances moyennes obtenues sont en général élevées vis-à-vis des taux de gâchage utilisés). Par rapport au résultat expérimental, la loi de FERET s'applique jusqu'à $(V_e/V_s)=1.5$, au delà elle sous- estime la résistance. Une loi puissance du type $R_c = a [x/(x+b)]^n$ rend mieux compte de l'évolution de résistance en fonction du rapport $X = V_e/V_s$. Ils proposent la loi suivante :

$$R_c = 23,3 \left[\frac{x}{(x - 0,37)} \right]^{0,25}$$

Avec :

R_c : Résistance moyenne à 28 jours

$x = E (C+A)$

E : Volume d'eau

C : Poids du ciment (Kg/m³)

A : Poids d'ajout (Kg/m³)

Signalons que Gibbs et al [13] ont fait aussi des tests sur des éléments de structure (poteau). Leurs résultats montrent que la résistance in situ des BAP est plus proche de la résistance à la compression à 28 jours d'élément standard (cube) que pour les bétons de référence.

D'autres travaux Khayat et al [18], Solyev [19], et Sonebi [20], confirment aussi que les BAP sont plus homogènes et caractérisés par une grande uniformité de résistance et de densité (l'uniformité des propriétés mécaniques de BAP) que celle du béton de référence.

L'étude de l'effet des conditions de cure sur les BAP [15] a montré que les éprouvettes conservées dans l'eau possèdent des résistances à la compression supérieures à celles conservées à l'air libre, et qu'à 28 jours la différence de résistance à la compression due aux conditions de cure (à l'air, à l'eau) est de 17% pour les BAP, et de 40% pour le béton de

référence. Ils en ont conclu que les conditions de cure ont moins d'effet sur les BAP que sur le béton de référence.

I-3-2 Le Retrait :

Nous distinguons deux types essentiels de retrait : Retrait endogène et retrait de dessiccation

Retrait endogène :

En utilisant plusieurs compositions de BAP et une composition traditionnelle, Hu et al [16] ont conclu que le retrait endogène des BAP était plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50 et 200 $\mu\text{m/m}$) que celui des bétons vibrés.

Retrait de dessiccation :

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, les mêmes auteurs ont procédé à deux modes opératoires de séchage (mode 1 : séchage immédiat pour se rapprocher des conditions chantier sans cure, mode 2 : conservation dans l'eau pendant 28 jours). Pour les conditions les moins favorable (mode1), les déformations de retrait dues au séchage des BAP étaient supérieures de 100 $\mu\text{m/m}$ à celle du béton traditionnel avec une fourchette de valeurs allant de 450 à 650 $\mu\text{m/m}$. Pour le mode 2, les résultats sont plus mitigés car certaines compositions ont des retraits identiques (entre 350 et 550 $\mu\text{m/m}$), alors que d'autres affichent des retraits supérieurs de 150 $\mu\text{m/m}$. Le tableau (I-7) fournit l'ensemble de leurs résultats.

	Endogène	Dessiccation mode 1	Dessiccation mode 2
Plage de variation des BAP (10^{-6})	50 à 200	550 à 650	350 à 550
Valeur du béton ordinaire (10^{-6})	200	450	425

Tableau I-7 : Valeurs des différents retraits à 200 jours d'après Hu et al [16]

Ogawa et al [21], Rol et al [22] constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des bétons ordinaires et ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus importante. Rol et al [22] évalue une augmentation de 50% du retrait de dessiccation d'un BAP par rapport à une formulation ordinaire. Quant à Hayakawa et al [23], il ne remarque pas

des différences notables (environ 450 $\mu\text{m/m}$ pour la formulation traditionnelle et la composition autoplaçante).

Les mêmes auteurs [23] ont observé un retrait de séchage plus faible (environ 200 $\mu\text{m/m}$ de moins à trois mois). Kuroiwa et al [24] trouve que les BAP sont plus sensibles aux problèmes de cure et qu'à des conditions de cure identiques, le retrait de dessiccation des BAP était plus faible que les bétons ordinaires.

Par ailleurs des chercheurs japonais ont comparé les retraits de dessiccation des bétons traditionnels et des bétons autoplaçants de même E/C avec et sans ajout d'urée. Les bétons autoplaçants renferment du filler calcaire à l'inverse des bétons traditionnels. Ces auteurs montrent que les retraits de dessiccation des BAP sont du même ordre de grandeur que les bétons traditionnels après des temps de séchage de 51 à 300 jours.

Le retrait de dessiccation est d'autant plus important que le rapport E/C est grand. L'ajout de filler calcaire ne semble pas avoir un rôle prépondérant.

Ces données contradictoires résultent de la comparaison des BAP et de béton de compositions totalement différentes en terme de E/C, de volume de pâte, de compacité granulaire etc.

On retiendra, compte tenu des connaissances acquises à ce jour, que :

- Le retrait endogène des BAP est au plus égal à celui du béton ordinaire.
- Le retrait de dessiccation des BAP est supérieur ou égal à celui du béton ordinaire.

I-4 Exemples de réalisations :

Au Japon, les bétons autoplaçants ont été utilisés dans différents projets. Leur utilisation se justifie par un gain de temps (pas de vibration) et une diminution de la main d'œuvre nécessaire lors de la phase de coulage, un meilleur confort de travail (moins de bruit, moins de personne sur le chantier). Dans le tableau I-8, sont présentés quelques exemples d'application d'après Sedran [5].

Type de projet	D _{max} (mm)	Agent de viscosité	Etalement (cm)	Résistance à 28 jours (Mpa)	Volume (m ³)	Type de mise en place
Immeuble de 20 étages : structure mixte acier avec noyau central en béton	20	oui	67.5	53	1500	pompage

Immeuble de 70 étages avec des colonnes métalliques remplies de béton allant jusqu'à 40 m de hauteur et comprenant jusqu'à 16 diaphragmes avec un diamètre d'ouverture de 18 cm	20	oui	71	44	880	Le béton est pompé par le bas des colonnes
Pile d'un pont à haubans construite avec des coffrages perdus préfabriqués en béton	20	oui	68	54	8000	Déversement à partir d'une benne à béton
Massif d'ancrage du plus long pont suspendu actuel (Akashi Kaikyo)	40	non	60	36	120000	pompage
Mur de 8m de haut et 20cm d'épaisseur. La densité de ferrailage rendait difficile l'insertion du tuyau de pompage	20	non	55	36	80	Déversement du haut des coffrages (8 m)

Tableau I-8 : Quelques exemples d'applications d'après Sedran [5]

Nous retenons de ces applications la méthode de mise en place qui est le pompage, qui apparemment ne nécessite pas de précautions particulières. Cependant, Tangtermsirikul et al [25] ont attiré l'attention sur la perte d'air liée au pompage.

Des essais de contrôle ont été effectués sur des ouvrages construits en bétons autoplaçants pour vérifier le retrait, l'uniformité des caractéristiques mécaniques, la durabilité etc.

- Pont Akashi Kaikyo : retrait similaire à un béton de référence : 460 à 480 $\mu\text{m}/\text{m}$ à 26 semaines.
- Réservoir de gaz naturel : des essais ont été effectués afin de vérifier l'uniformité des caractéristiques du béton durci en fonction de la longueur d'écoulement parcourue par le béton, le béton n'a pas été affecté par la longueur d'écoulement.
- Immeuble de 20 étages : ils ont observé une excellente durabilité (expliquée par la faible teneur en eau), avec 4% d'air entraîné le béton a montré une résistance au gel-dégel.

- Réaménagement d'un port japonais : ils ont observé une pénétration des ions chlore plus faible dans le cas du béton autoplaçant que dans le béton témoin (expliquée par la diminution des défauts dus au ressuage).

Il convient de remarquer que l'influence des conditions de transport des BAP depuis la centrale jusqu'au chantier et aux coffrages n'a pas fait l'objet d'études systématiques. Cependant, il est parfois mentionner qu'il faut prendre des précautions pour ne pas provoquer de vibration intensive.

CHAPITRE II

SYNTHESE SUR LES BETONS AUTOPLACANTS FIBRES

II- LE BETON AUTOPLACANT FIBRE :

II-1 : Particularités :

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

II-2 : Conditions optimales de fonctionnement des fibres :

Rossi [26] a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton fibré et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent suivies de leur connexion et de la formation de macrofissure, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent coudre les microfissures, en retardant la formation des macrofissures tout en assurant la capacité portante et la ductilité à l'échelle de la structure.

Dans le cas des efforts de compression, le processus de fissuration commence par les microfissures verticales parallèles au chargement, suivies de leur élargissement puis de la formation de fissures obliques, qui sont plus sensibles au niveau du comportement de la structure. Le rôle des fibres est d'empêcher le développement des microfissures en retardant la formation de fissures obliques et en assurant la capacité portante de la structure.

De plus, l'action des fibres est grandement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans les cas des fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leurs lèvres et les fibres travaillent en traction. Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y'a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables.

Les fibres doivent avoir des dimensions compatibles avec les types de fissures, le niveau des résistances du béton et la taille des granulats. Pour les microfissures, on doit utiliser des fibres courtes et en grande quantité, et pour les macrofissures, des fibres longues en moins grande quantité afin d'assurer une bonne ouvrabilité. Dans les cas où la rupture peut arriver à l'interface matrice-granulats, on doit utiliser des fibres plus longues 2 à 3 fois le diamètre maximale des granulats de manière à assurer la couture de la fissure.

Si l'on veut qu'il y ait une synergie positive des fibres mixtes, il est nécessaire qu'il en ait un pourcentage minimum : c'est le pourcentage d'efficacité ou le pourcentage seuil. Après un palier où les teneurs en fibres sont efficaces on peut atteindre une teneur pour laquelle la zone de transition devient trop faible, même si la pâte est très riche, et l'efficacité globale s'en trouve réduite. C'est le pourcentage de saturation en fibres.

Pour un composite idéale, d'après Peiffer [27-28], la longueur optimale d'une fibre doit être égale à deux fois la longueur d'ancrage L_c de façon à avoir un bon comportement mécanique du point de vue de l'arrachement ou de la rupture de la fibre. A rapport volumique constant de fibres dans le béton, si la longueur des fibres est inférieure à $2L_c$, il y a tendance à l'arrachement des fibres et pour des longueurs plus grandes que $2L_c$, on peut avoir à la fois des arrachements et des ruptures des fibres.

II-2-1 : Mécanisme de fonctionnement du couple béton-fibre :

L'inclusion des fibres au sein du béton forme un composite où la matrice est la pâte. Les propriétés du composite sont le résultat de plusieurs facteurs comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton. La figure II-1 schématise la répartition des efforts d'arrachement d'une fibre noyée dans une matrice cimentaire. La figure 1a montre une fibre noyée dans la matrice et la figure 1b montre la sollicitation d'une fibre par les contraintes de cisaillement amenées par l'adhérence entre la fibre et la matrice.

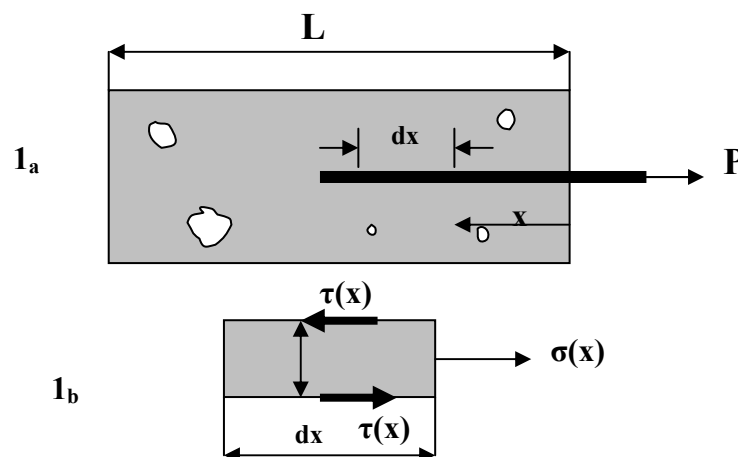


Figure II-1 : Interaction fibre-matrice : efforts et contraintes induits pour l'arrachement D'une fibre

D'après BENTUR [29], il existe deux stades de comportement lors du chargement d'un béton fibré. Au départ, les déformations sont les mêmes tant pour les fibres que pour la matrice. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre – matrice, défini par τ_u , le mécanisme de résistance principal devient, au cours du déchaussement de la fibre : le frottement. La valeur de la résistance reste constante et égale, définie par τ_u . La figure II-2 montre les étapes du comportement au cours du chargement.

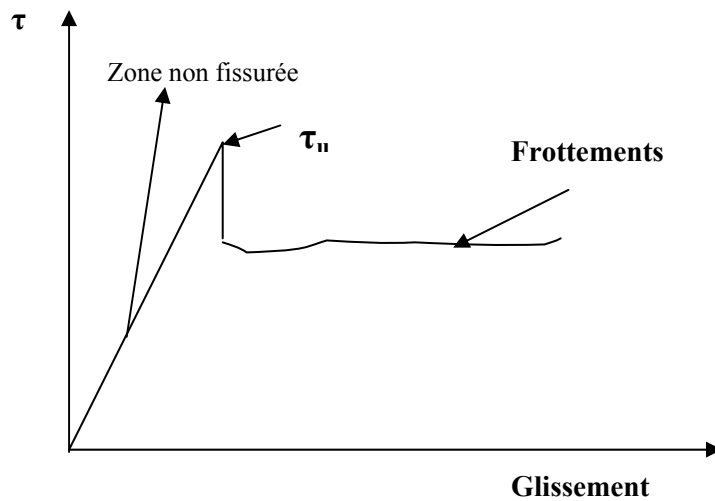


Figure II-2 : Evolution de la contrainte d'adhérence fibre-matrice en fonction du déplacement

II-2-2 : Rôle des fibres dans le béton :

Les fibres enrobées par le béton assurent des transferts d'efforts qui empêchent le développement des microfissures ou des macrofissures lors du chargement. L'efficacité de ce fonctionnement dépend principalement du type d'effort, du pourcentage des fibres, de leurs dimensions, de leurs résistances mécaniques et du niveau de chargement. Les différentes fibres agissent en fonction du stade du chargement imposé : Les microfibres contiennent la microfissuration et les macrofibres limitent les macrofissurations. En fonction du niveau du chargement et de la condition d'ancrages de la fibre dans le béton, il peut y avoir soit glissements des fibres par rapport au béton, soit rupture, soit déchaussement. La répartition des efforts sur une fibre soumise à un arrachement a été décrite sur la figure II-1.

La figure II-3 d'après Peiffer [27-28], schématise les longueurs d'ancrages critiques des fibres (L_c) pour des situations données. Dans le cas où la longueur d'ancrage des fibres est inférieure à L_c , on peut avoir des glissements des fibres par rapport à la matrice et dans la situation contraire, on a rupture des fibres. La longueur d'ancrage des fibres peut-être calculée en fonction de leurs caractéristiques géométriques, selon les équations (1) et (2).

$$L_c = \frac{\sigma_u}{\tau} \cdot \frac{A}{p} \quad (1)$$

Où :

σ_u : est la contrainte ultime de rupture à traction de la fibre.

τ : est la contrainte de cisaillement entre la fibre et la matrice.

A : est l'aire de la section transversale de la fibre.

p : est le périmètre de la section transversale de la fibre.

Dans le cas des fibres rectangulaires de petite épaisseur :

$$L_c = \frac{\sigma_u}{\tau} \cdot \frac{e}{2} \quad (2)$$

Où « e » est l'épaisseur de la fibre.

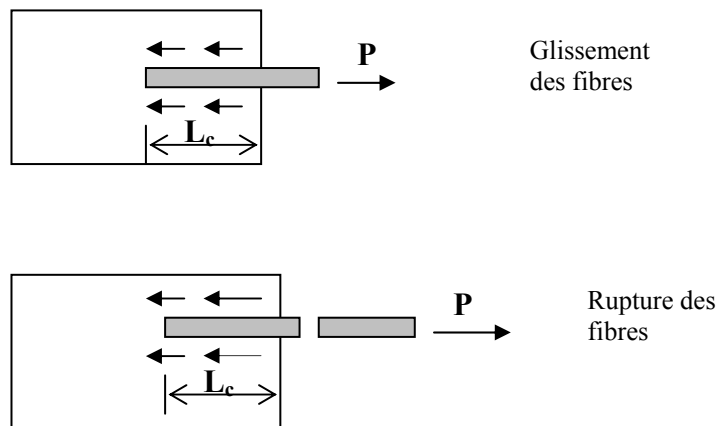


Figure II-3 : Influence de la longueur d'ancrage sur le comportement

II-3 : Propriétés et Comportement du béton fibré dans les structures :

II.3.1 Propriétés mécanique :

II.3.1.1 : Sollicitations de compression :

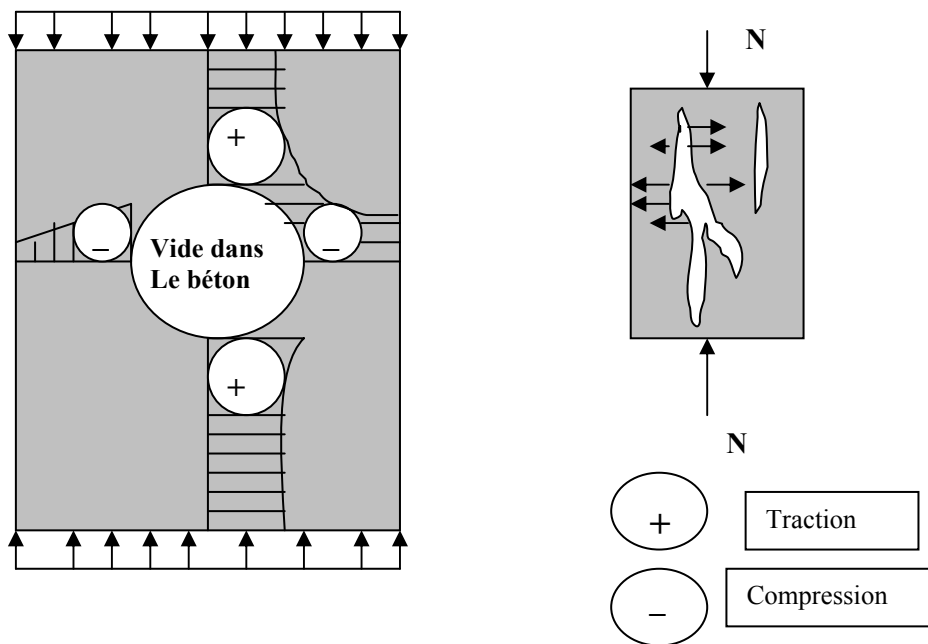


Figure II-4 : Mécanismes de distribution des contraintes internes en essais de rupture du béton par compression. Influence des contraintes induites

De manière courante on admet, pour les bétons classiques, que le mécanisme de rupture en compression dépend d'abord des événements de rupture en traction interne (voir fig II-1). D'abord apparaissent des fissures parallèles au chargement, et ensuite se forment des fissures obliques.

Pour Rossi [26], l'origine de ces fissures de traction pendant la compression serait due à des contraintes au niveau de la pâte de ciment durci, causées par différence de raideur entre celle-ci et les granulats. Le phénomène se passerait à une échelle tellement petite de manière qu'il ne serait pas économique d'utiliser des fibres pour augmenter la résistance à la traction du béton. Par ailleurs la présence des fibres dans le béton peut-être une hétérogénéité, et de plus entraîner une augmentation des contraintes internes.

Dans le cas d'utilisation des fibres longues, leurs pourcentages doivent être faible pour assurer l'ouvrabilité du béton. Une matrice fibrée est généralement moins résistante que la

non fibrée de mêmes composantes et de même ouvrabilité. Dans le cas des efforts en compression, on peut considérer que l'amélioration globale au niveau du comportement de la structure est masquée par la réduction de la résistance de la matrice.

Inversement, il y a des auteurs qui constatent des améliorations au niveau de la résistance à la compression grâce à l'utilisation des fibres dans le béton. Bascoul et al [30] montrent, concernant des bétons à Haute Performance, des améliorations de résistances en compression environ 25% par rapport à celle du béton non fibré, après l'utilisation de micro-fibres métalliques de 13 mm de longueur, et de 80Kg/m³ de teneur.

II-3-1-2 : Comportement en Traction :

Casanova [31] évalue le béton fibré à partir d'une composition de départ non fibrée. Il y a une grande différence entre rajouter des fibres dans une composition déjà optimisée et optimiser directement une composition fibrée. Avec les fibres longues, on arrive rapidement au stade de la saturation. Pour les fibres courtes, l'augmentation de leur teneur peut avoir pour conséquence soit la diminution des résistances à cause de l'augmentation de l'hétérogénéité, soit leur augmentation due à l'efficacité des fibres pour contenir les microfissures, soit une stagnation si on atteint la saturation en fibres.

Peiffer [27-28] présente des résultats sur le comportement résiduel post-pic, observé lors d'essais en traction avec des fibres métalliques du type de celles utilisées dans cette étude, des fibres métalliques amorphes, de 15 mm et 30 mm de long au dosage de 60 Kg/m³. Le diamètre des gros granulats n'a pas été présenté. Les performances sont améliorées dans le cas des fibres de 30 mm. D'après l'auteur, on peut imputer cela à la valeur plus élevée d'énergie dissipée au cours de la fissuration de la matrice. Dans un autre cas pour des teneurs en fibres de 36Kg/m³ et en utilisant des fibres de 30mm et 60mm, la performance a été meilleur pour le cas des fibres de 30mm. Dans ce cas l'auteur impute à l'effet de la diminution de l'ouvrabilité, la performance moindre des fibres de 60mm.

II-3-1-3 : Comportement en flexion :

Dans le cas de résistance aux efforts de flexion, l'addition des fibres entraîne souvent une augmentation de résistances maximales et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré (Fig II-5). L'augmentation de la résistance à la flexion post-fissuration est due aux ponts et liaisons créés par les fibres, placées

stratégiquement et qui couturent les fissures. Le processus de rupture se développe lors de la perte de ces liaisons et le déchaussement des fibres.

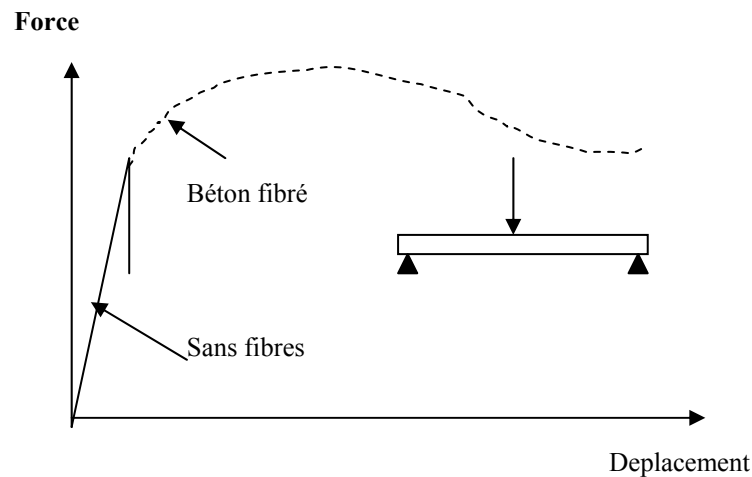


Figure II-5 : Courbes force-déplacement en flexion 3 points dans les cas des bétons fibrés et non fibrés

Pour une même teneur en fibres et un même type de fibres, Peiffer [28], montre que l'efficacité des fibres de 30 mm est meilleure que celle de fibres de 45 mm, aussi bien pour les résistances à la flexion que pour les déformations post-pic. Il explique ce comportement par les aspects de porosité, d'ouvrabilité et de mise en œuvre, qui sont les plus favorables pour les cas des fibres de 30 mm. De plus, selon ce même auteur une fibre d'acier de section plus fine permet une meilleure liaison d'interface fibre-matrice. Dans ce cas une teneur de 0,6% en fibres a la même efficacité que l'utilisation de 2% de fibres plus grosses et ce pour un même béton.

Des associations des fibres de différentes caractéristiques commencent à être utilisées. Kawamata et al [32] montrent que l'association des fibres synthétiques et des fibres métalliques peut donner aux bétons à Hautes performances des comportements plus ductile, et dans le cas des bétons fibrés seulement avec des fibres métalliques. MARKOVIC et al [33] ont essayé d'utiliser dans le cas des bétons autoplacants des fibres longues en association avec les fibres courtes. Selon ces auteurs, les fibres courtes empêcheront la formation des petites

fissures, retardant ainsi la formation des macrofissures, qui seront reprises par les fibres plus longues et demanderont une plus grande dissipation d'énergie pour rompre. Par cela la ductilité du matériau est améliorée.

La ténacité des matériaux peut-être évaluée à partir de l'énergie dépensée au cours de leur rupture sous chargement. On peut la quantifier en mesurant l'aire sous la courbe Force-déplacement. Grâce à l'augmentation de la résistance post pic, on peut constater que l'énergie dépensée lors de la rupture est plus grande pour les bétons fibrés que pour les bétons ordinaires. On peut aussi caractériser le comportement élasto-plastique des matériaux au travers des indices et relations de ténacité.

Selon la norme ASTM C108, on évalue l'aire située sous la courbe effort-déformation pour des valeurs particulières « x » de déflexion. On relève, de la même manière, l'aire mesurée jusqu'à la valeur de déflexion « δ » entraînant la première fissure. On fait les rapports entre les valeurs des énergies représentées par ces points particuliers et l'énergie consommée jusqu'au point de la première fissure. On obtient, ainsi, une valeur d'un indice de ténacité, « I_x ». Les valeurs qui sont préconisées pour la norme ASTM C108 sont : 3δ pour I_5 , $5,5\delta$ pour I_{10} , et $15,5\delta$ pour I_{30} . La figure II-6 montre les points adoptés par la méthode.

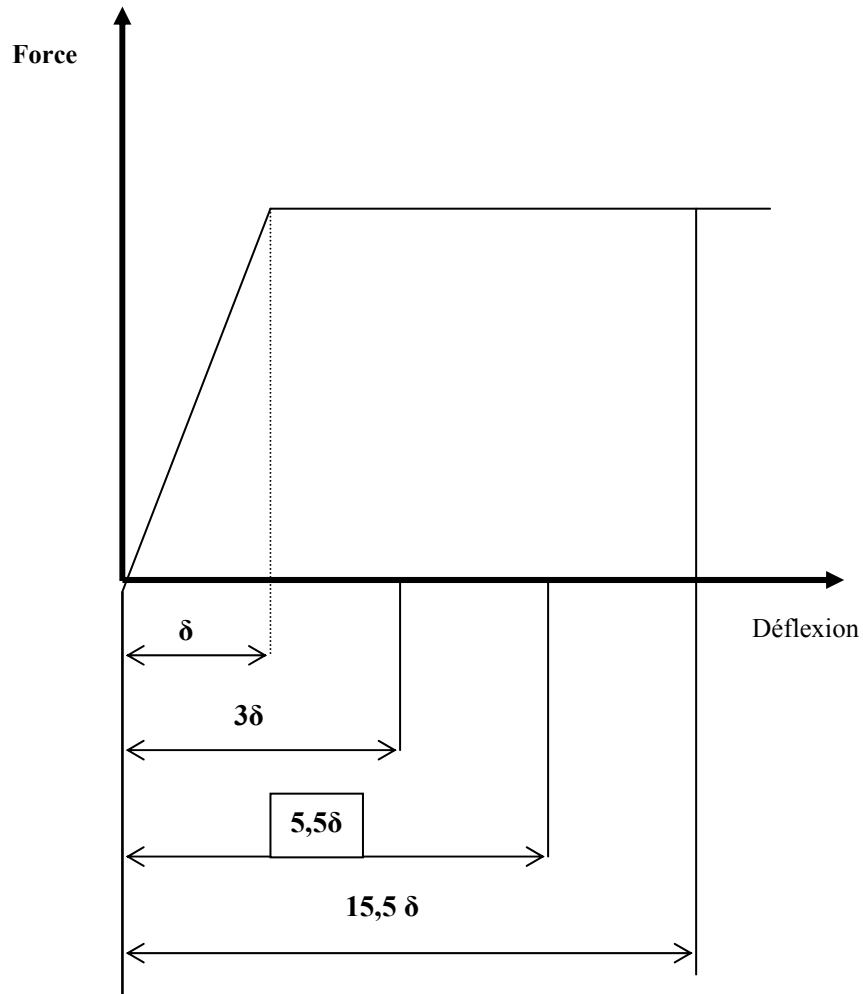


Figure II-6 : Méthode de calcul des indices de ténacité selon la ASTM C108.

A partir des valeurs des indices de ténacité, on calcule les relations, définies par la norme ASTM C108 par :

$$R_{a,b} = \frac{100}{b-a} \times (I_b - I_a)$$

Où $R_{a,b}$ est la relation de ténacité entre les indices référencés par « a » et « b ».

I_a et I_b sont les indices de ténacité référencés par « a » et « b ».

Cette méthode présente des limites, en particulier pour estimer la déflexion lors de l'apparition de la première fissure.

Une autre critique de cette méthode est avancée par FIGUEREDO [34], elle ne prend pas en compte la résistance de la matrice ce qui entraîne que les matériaux de différentes résistances mécaniques peuvent sembler avoir le même comportement lorsqu'ils sont évalués par cette méthode.

Une autre méthode d'évaluation du comportement des matériaux est préconisée par la norme JSCE-SF4. Dans ce cas, la déflexion « δ_{tb} » correspond à la valeur définie par $L/150$, L étant la portée de l'élément fléchi (figure II-7)

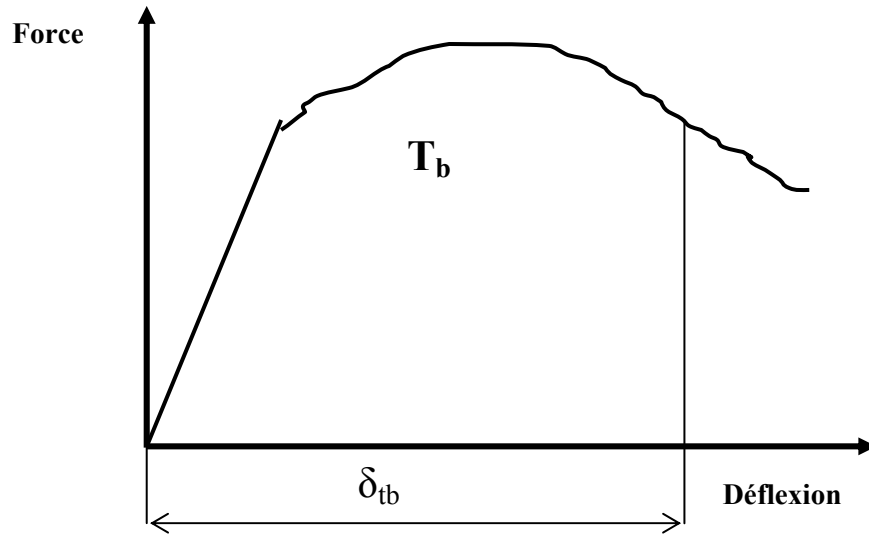


Figure II-7 : Méthode de calcul de facteur de ténacité par la méthode JSCE-SF4

$$F_t = \frac{T_b}{\delta_{tb}} * \frac{L}{bh^2} \quad (4)$$

Avec :

F_t : Facteur de ténacité.

T_b : Ténacité en flexion en (Kgf/cm² ou J)

δ_{tb} : Déflexion équivalente à $L/50$.

b : Largeur de l'éprouvette

h : Hauteur de l'éprouvette

L : Distance entre appuis

Cette méthode, présente aussi des limites. Elle ne fait pas la différence entre les matrices qui ont des valeurs de module d'élasticité et un comportement post fissuration différents si elles ont la même consommation d'énergie. De plus la méthode ne s'intéresse pas à la résistance et au pic à la fissuration.

II-3-1-4 : Sollicitations de cisaillement :

En ce qui concerne la résistance aux cisaillements créés par l'application des efforts de flexion, ROSSI [26] présente des exemples où on peut se dispenser, grâce à l'emploi de fibres, des armatures traditionnelles d'effort tranchant.

II-3-1-5 : Comportement cyclique et dynamique :

HOUARI et al [35], ce sont intéressés à la résistance en flexion sous les efforts cycliques. Ces efforts sont représentatifs de ceux auxquels sont soumis les constructions marines, les ponts etc. L'étude montre que l'efficacité du béton fibré sous ce type d'effort dépend surtout du type de fibre et de leur capacité de dispersion dans le mélange. Les fibres longues et le rapport longueur sur diamètre important présentent de meilleurs performances que celle courtes et épaisses.

Selon CASANOVA [31], le comportement dynamique des structures est amélioré grâce à l'énergie qui est dépensée lors de l'arrachement des fibres

II-3-2 : Comportement différé : fluage et retrait :

D'après CASANOVA [31], le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi du type de matrice. Dans le cas des bétons fibrés et non fibrés qui ont la même composition de matrice, l'addition de fibres change légèrement ce comportement mécanique, et, il est probable que, pour un béton fibré avec un dosage optimisé, le comportement soit meilleur en fluage. Dans les cas de chargements de faible intensité (à peu près de 30% de la résistance du matériau), les fibres ne peuvent pas jouer leur

rôle de couture, et donc, on ne peut observer une amélioration du comportement au fluage. Certaines études sont même contradictoires. VIEIRA et BITENCOURT [36] affirment que la déformation de fluage est de 25% supérieure à celle des bétons vibrés. ASSIE et al [37] trouvent également une déformation de fluage supérieure de 30%. Par contre, PROUST et al [38] et VITEK [39] ont trouvé des valeurs de même ordre de grandeur pour des BAP et pour les bétons vibrés. Selon le même auteur le BAP peut substituer sans problèmes au béton vibré dans les structures. Enfin, CHOPIN et al [40] après la comparaison d'un béton vibré de référence présentant le rapport volumique de 0,7 avec 05 BAP de rapports volumiques de 0,64- 0,57 – 0,64 – 0,63 – 0,64 ont conclu que les BAP étuvés ne présentent pas de déformations élastiques différées significativement différentes de celles du béton conventionnel.

Pour le retrait, d'après, d'après BÄUML & WITTMANN [41] les BAP sont susceptibles de présenter des niveaux plus élevés de retrait à cause du pourcentage plus élevé de pâte dans la composition. JOHANSEN & HAMMER [42], présentent des résultats où la diminution du module de finesse du sable conduit à une augmentation importante du retrait des BAP. Ils font la même constatation en utilisant la fumée de silice.

HEIRMAN et VANDEWALLE [43] ont comparé le comportement différé des BAP présentant un rapport volumique de 0,6 et des bétons vibrés de rapport volumique de 0,68. Ils ont trouvé 02 BAP pour lesquels le retrait étaient 02 fois plus fort que les retraits du béton vibré de référence, mais dans la même étude 04 BAP ont présenté des valeurs de retrait dans une fourchette qui serait admissible pour les bétons vibrés.

Les retraits des BAP seraient plus accentués aux jeunes âges. Selon KLUG et HOLSCHMACHER [44], les retraits sont de 50% supérieurs pour les BAP avant 28 jours, après, les retraits des BAP se rapprochent de ceux des bétons vibrés.

Enfin PROUST et al [38] et ASSIE et al [37] trouvent des retraits légèrement supérieurs pour le cas des BAP. Pour les premiers, les rapports volumiques des granulats étaient de 0,66 – 0,65 – 0,68 pour les BAP et 0,68 pour les bétons vibrés, et pour les autres, les rapports volumiques étaient situés à 0,65 pour les BAP et à 0,7 pour les bétons vibrés.

Il y a des avis divergents sur les retraits des BAP, mais selon PONS [45], dans la majorité des cas, les écarts entre les retraits des BAP et ceux des bétons vibrés se situent dans la fourchette usuellement admise de $\pm 30\%$.

II-3-3 : Influence des fibres sur l'ouvrabilité :

Dans les travaux de GROTH et NEMEGEER [46] et ainsi que dans le centre de recherche de Pont à Mousson [47], on relève que l'addition des fibres au béton influence directement son ouvrabilité. Pour GROTH et NEMEGEER [46], cela est fonction du volume des fibres par rapport au volume total du béton et de leurs caractéristiques géométriques, notamment leur longueur par rapport à leur diamètre.

Les variations d'ouvrabilité du béton dues à l'addition de fibres sont mises en évidence par les essais d'ouvrabilité du béton frais, comme l'essai d'étalement « slump flow » et essai de la boîte en L.

Ces essais permettent d'évaluer la fluidité du béton frais et l'absence de la ségrégation (pour le premier), et la fluidité, la capacité de remplissage et l'absence de blocages (pour le second).

Pour l'essai de la boîte en « L » utilisé par GROTH et al [46], il n'y avait pas de barres d'acier pour évaluer les blocages. Par contre, un essai d'étalement du cône d'Abrams « slump flow » en association d'un système circulaire des armatures disposées autour du cône, selon la direction d'étalement (essai J-ring), a été réalisé. Les hauteurs du béton en amont et en aval de l'armature sont mesurées et la relation entre la deuxième valeur par rapport à la première, comme dans le cas de la boîte en « L », évalue la capacité de remplissage du béton. Ces essais sont conçus initialement pour évaluer l'« autoplaçabilité » des bétons destinés à la fabrication des dallages.

On peut citer encore, encore, l'essai V-funnel pour l'évaluation d'écoulement des bétons dans un milieu confiné. Selon le CEBTP [47], cet essai permet d'évaluer la stabilité du béton lors de l'écoulement. On associe la durée d'écoulement à la perturbation du béton à cause des collisions inter-granulaires. Moins le béton est stable, plus il y a des perturbations.

Bien que cela pose certains problèmes, GROTH et NEMEGEER [46] affirment que l'utilisation des fibres dans les bétons autoplaçants est envisageable et qu'il est possible de respecter les conditions exigées pour l'ouvrabilité des BAP classiques. De même AMBROISE et al [17] disent que l'addition des fibres au béton ne nuit pas aux propriétés du béton autonivelant.

L'importance de la fluidité pour le béton fibré est soulignée par KHAYAT et al [48]. Ils montrent que l'interaction des granulats avec les fibres est très influente sur les phénomènes de blocage. Cette interaction est également relevée dans [47]. Il y a un rapport idéal entre le pourcentage du sable et les granulats totaux de manière à optimiser la fluidité et l'étalement en fonction de l'addition des fibres à la teneur désirée.

II-3-4 : Influence de la teneur en fibres sur la composition des BAP :

GRUNEWALD et WALRAVEN [49] présentent une étude sur les propriétés du béton autoplaçants frais, en fonction de la teneur en fibres (polypropylène et métallique et de longueur comprise entre 30 et 60 mm), et de la composition de référence. Le pourcentage de sable a été établi à 40% du volume du mortier. Les essais réalisés sont : l'essai d'ouvrabilité au V-funnel, l'essai au cône d'Abrams et l'essai J-ring. Les principales conclusions sont récapitulées ci-dessous :

- Toutes les compositions sont sensibles à l'augmentation de la teneur en fibres, notamment au niveau de l'augmentation de la résistance à l'écoulement, diminution de la capacité de passage à l'essai j-ring, et diminution de la dimension et ovalisation de galette.
- Les compositions dont le volume du mortier était minimal ont présenté les problèmes majeurs lors de l'augmentation de la teneur en fibres.
- La procédure de substitution des fibres aux granulats en volume égal est une bonne solution pour optimiser l'insertion des fibres.

Ils ont noté que l'augmentation de la teneur en fibres induit un changement de la forme de la galette, qui de circulaire a une tendance à s'ovaliser. L'augmentation de la teneur en fibres peut avoir tendance à provoquer des gros amas situés au centre de la galette, concentration due à un conglomerat de gros granulats et de fibres. Pour l'essai J-ring, l'augmentation de la teneur en fibres exige des ouvertures plus grandes pour augmenter la capacité de passage du béton.

GRUNEWALD et WALRAVEN [50] présentent aussi une étude sur l'influence de la teneur en fibres dans les mortiers, en faisant varier le pourcentage du sable. Sont utilisées des fibres métalliques et synthétiques. Pour les 02 types de fibres ils ont constaté au travers des essais au V-funnel et au cône d'Abrams une augmentation de la résistance à l'écoulement,

ainsi qu'une diminution de l'étalement. La facilité d'insertion des fibres au béton varie dans le sens inverse de l'augmentation du pourcentage du sable dans le mortier.

Une autre observation concernant l'influence de l'insertion des fibres au béton sur la compacité finale du mélange. GRUNEWALD et WALRAVEN [51], ont réalisé 04 compositions de BAP fibrés avec différents fibres métalliques, de longueur 30, 40, 60, et 30,5 mm et ils les ont comparées avec une composition de référence. Ils ont fait varier le pourcentage du sable dans le volume total des granulats. La compacité maximale pour la composition de référence a été obtenue pour un rapport sable sur granulats totaux d'environ 40%. Dans ce cas la composition de référence a été plus dense que les autres compositions fibrées. Par contre, pour une valeur de 75% du sable on obtient la même densité tant pour la composition de référence que pour toutes les différentes compositions fibrées. L'impact des fibres est moindre pour les valeurs plus élevées de sable dans les granulats totaux.

Pour établir une loi de la variation d'étalement par rapport à la teneur en fibres, GRUNEWALD et WALRAVEN [51] ont adopté les 04 compositions citées précédemment. Ils ont trouvé que pour un domaine d'étalement supérieur à 600 mm, la variation du diamètre d'étalement varie linéairement en fonction du facteur fibres, donné par $(V_f \cdot L/D)$, où V_f est le volume de fibres, 'L' est la longueur de la fibre, et 'D' est le diamètre de la circonférence inscrite dans la section de la fibre.

II-4 : Intérêt des bétons autoplaçants fibrés durcis :

GRUNEWALD et al [52] présentent des études de BAP dans la fabrication d'éléments préfabriqués pour la construction des tunnels. Ils ont observé que le sens de coulage influe sur les caractéristiques mécaniques des bétons durcis parce que les fibres sont alignées favorablement dans le sens du coulage, sauf quand il y a un effet de paroi. MARKOVIC et al [33] mettent en avant les avantages du BAP fibré par rapport aux bétons vibrés, à cause de l'effet d'orientation des fibres et de leur distribution. Pour les bétons vibrés, la vibration peut conduire à la mauvaise distribution des fibres de manière qu'on peut avoir des régions pauvres en fibres donc faible en renforcement.

Selon GRUNEWALD et al [52], il y a des corrélations entre les résistances au fendage des BAP fibrés et le facteur d'orientation des fibres. La situation la plus privilégiée est quand les fibres sont perpendiculaires à la direction des efforts. Pour les propriétés mécaniques

comme le module d'élasticité, la résistance à la compression et à la traction par fendage, les différences ne sont pas très différentes par rapport aux bétons autoplaçants non fibrés.

II-5 : Rhéologie du béton autoplaçant à l'état frais :

D'après les travaux du CEBTP [47], le comportement rhéologique du béton autoplaçant est comme pour les pâtes de ciment ordinaires en accord avec le modèle proposé par Herschel-Bulkley :

$$\tau = \tau_0 + a\gamma^b \quad (5)$$

“ a ” et “ b ” sont des constantes qui décrivent le comportement de la pâte.

Ces résultats ont été obtenus à l'aide d'un rhéomètre développé pour que l'échantillon de béton soit mis en mouvement en milieu confiné entre 02 cylindres de rayon r_1 et r_2 , comme schématisé sur la figure II- 8. Un champ de vitesse est créé. On évalue les valeurs des couples résistants M perçus sur l'axe de rotation, sur chaque valeur de vitesse ω , imposées.

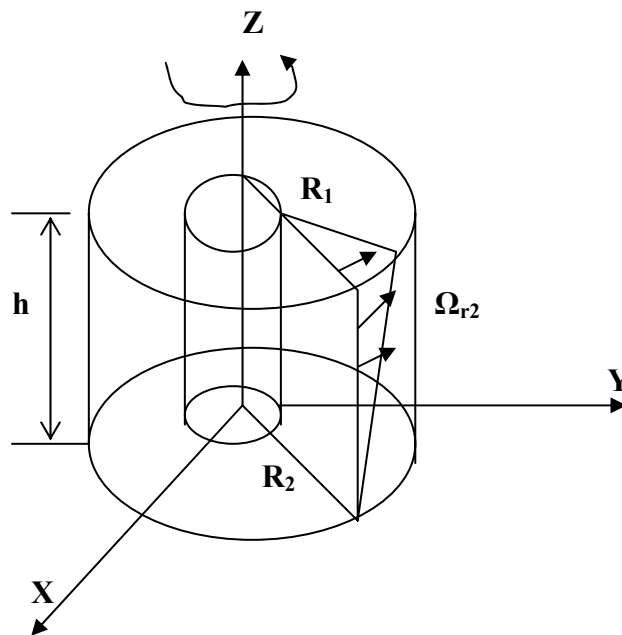


Figure II-8 : Ecoulement dans le rhéomètre du LCPC

Les rhéogrammes $M(\omega)$ pour les BAP présentent des évolutions non linéaires, avec un comportement fluidifiant ($b < 1$) pour les cas des rapports gravier/sable inférieur à 0,56, et un comportement épaississant pour les cas où ce rapport est supérieur à 1.

ALCANTARA. M [53] présente dans sa thèse des résultats sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants et les bétons autoplaçants fibrés en accord avec le modèle de HERSCHEL – BULKLEY, du type épaississant. L'auteur montre l'intérêt de ces essais pour déterminer le seuil de cisaillement et le coefficient de viscosité μ .

KACI & BOURAS [54] présentent une étude sur les propriétés rhéologiques des BAP fibrés. Les essais d'identification des paramètres du béton prennent pour hypothèse qu'il est du type viscoplastique binghamien. Ils ont pour cela porté les valeurs des couples M enregistrés sur l'axe en fonction des valeurs de la vitesse ω imposée. Ils ont ainsi pu établir une relation linéaire qui permet, qui permet à partir de la pente de la courbe et de son point de l'intersection avec l'axe des ordonnées de calculer les valeurs de τ_0 et de μ .

τ_0 et μ sont obtenus à partir des relations suivantes :

$$\mu = \frac{\left(\frac{1}{r_1^2}\right) - \left(\frac{1}{r_2^2}\right)}{4\pi h A} \quad (6)$$

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{r_1^2}\right) - \left(\frac{1}{r_2^2}\right)}{4\pi h \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * \frac{B}{A}} \quad (7)$$

Où A est la pente de la courbe obtenue à partir de M et de ω .

Et B est l'ordonnée à l'origine.

Pour Kaci et al [54], dans le cas des BAP fibrés avec des fibres métalliques de 30 et 50 mm de longueur, plus la viscosité du matériau est élevée, plus la valeur minimale de contrainte pour l'écoulement est élevée, plus la valeur minimale de contrainte pour l'écoulement est élevée ; et plus la teneur en fibres du béton est grande, plus la valeur de la contrainte minimale demandée pour l'écoulement est grande, ce qui se traduit par la diminution de l'ouvrabilité du béton.

Pour une teneur volumique dans les bétons de 2,5% en fibres le comportement rhéologique du béton subit un brusque changement, se traduisant par l'augmentation brutale de la viscosité du matériau.

CONCLUSION :

L'étude bibliographique menée sur les bétons autoplaçants, et les bétons autoplaçants mono-fibrés et bi-fibrés nous a conforté dans le fait que les points que nous allons étudier dans ce travail : à savoir : Formulation, retrait, comportement mécanique (compression, traction, et flexion) et rhéologie peuvent être abordés tout en analysant, le seuil de réponse mécanique pour chaque dosage prédéfini

CHAPITRE III

OPTIMISATION DES COMPOSITIONS

III- OPTIMISATION DES COMPOSITIONS DES BETONS AUTOPLACANTS ET BETONS AUTOPLACANTS MONO ET BI-FIBRES

L'habitude a été prise de décliner les BAP en deux familles d'applications. La première emploie le terme **“béton autoplaçant”**, ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc...). La seconde désigne sous l'appellation **“béton autonivellant”**, ou BAN, les bétons destinés aux applications horizontales (dalles). Dans cette catégorie, il faut ajouter les mortiers autonivellants, qui connaissent un succès important pour les chapes (jusqu'à être désignés par extension par **“chapes fluides”**).

Chaque famille de BAP est formulée suivant un même principe, mais possède néanmoins certaines particularités. La formulation des BAN comporte à priori moins de contraintes que celle des BAP. Dans leur cas, seul l'essai d'étalement est couramment effectué. L'essai de la boîte en L n'a pas de réelle utilité, puisque les dalles sont des milieux peu confinés. Il est à noter que les BAN doivent être peu visqueux pour avoir une grande capacité d'auto-nivellement. La mesure du temps pour obtenir l'étalement final, ou encore un étalement de 50 cm (souvent noté t_{50}), est à ce titre une donnée utile pour évaluer la viscosité. Il est regrettable en revanche que la stabilité des BAN ne soit que rarement contrôlée avec l'essai au tamis.

Sauf mention, nous employons dans la suite l'appellation **“générique”** de BAP, sans distinguer les applications, pour désigner tous bétons répondant au moins aux critères de l'AFGC sur l'étalement et la stabilité au tamis.

III-1 : Procédure et Stratégie Expérimentale :

III-1-1 : Formuler un béton :

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est à dire l'affaissement au cône d'Abrams. La composition de la matrice répond à des exigences de compacité et de fluidité, la résistance en compression n'étant que le résultat et non le but de notre démarche. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent –être demandées, comme, par exemple une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La

solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de DREUX-GORISSE. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables/gravillons sur une courbe de référence.

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

III-1-2 : 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 BPE, et notamment l'industrie des bâtiments, 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 (bétons ordinaires) 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 du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme 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 développés leur propre outil. Ce sont 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 formulation, 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 à l'état frais d'abord. 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.

METHODE BASEE 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 au gravillon [55]. 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.

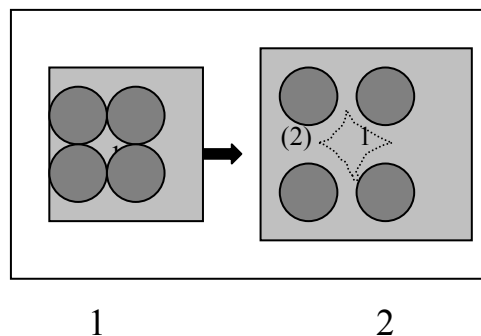


Fig III-1 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)

Dans ce cas le béton, est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. C'est alors que la notion d'excès de pâte est introduite, comme mentionnée sur la figure III-1. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage. DE LARRARD et al [8] 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.

METHODE BASEE SUR UN PLAN D'EXPERIENCE:

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressant pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al [56] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse des fines (C+A), le rapport massique eau sur fines $E/(C+A)$, la masse du 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'AFGC.

A la lumière de ce qui a été dit, les bétons autoplaçants restent des bétons relativement nouveaux en France et ailleurs. L'AFGC [4] a mis en place des techniques pour les caractériser à l'état frais, qui se sont répandues rapidement dans la profession du béton prêt à l'emploi (BPE). Il reste que, pour l'heure, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode de Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

III-1-3 : Les matériaux utilisés :

a) Granulats :

Les granulats utilisés sont des granulats alluvionnaires roulés, provenant de la région de haute garone. Deux classes de granulats sont utilisées lors de la formulation des bétons : du sable 0 /4 et des gravillons 4/10 (la taille maximale des gravillons est choisie de façon à éviter tout blocage lors de l'essai de la boîte en L pour le BAP). Les courbes granulaires obtenues par tamisage sont présentées sur les figures III-2 et III-3.

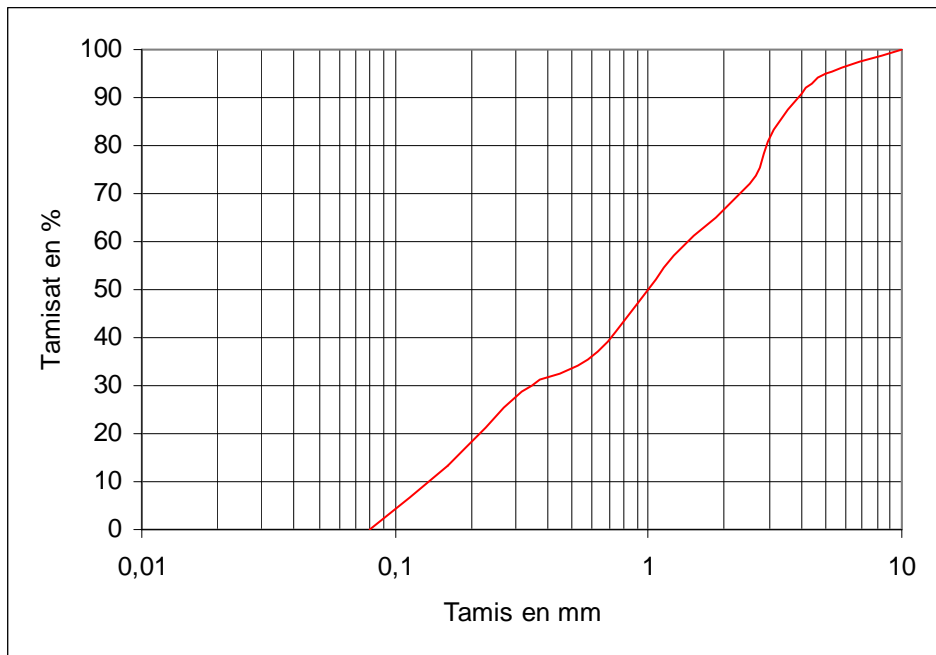


Figure III-2 : courbe granulaire du sable

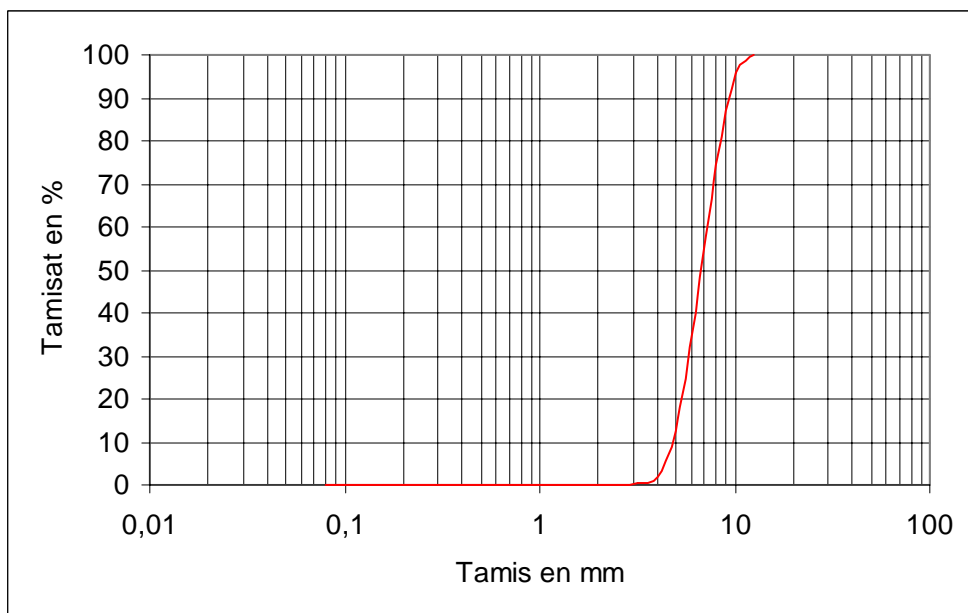


Figure III-3 : Courbe granulaire des gravillons

b) addition minérale

Rôle des fines :

Les superplastifiants permettent donc d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des bétons autoplaçants. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis de la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites. Pour augmenter la quantité de pâte d'un béton autoplaçant, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. Ces matériaux peuvent avoir une influence chimique et/ou un rôle physique selon leur nature.

Les cendres volantes :

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une faible influence sur le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [11]. Certains auteurs remarquent cependant que leur utilisation peut améliorer la fluidité, car leur forme sphérique permet de réduire les frottements entre les grains de ciment. Miura et al. [2] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement, les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 μm). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de l'ordre de 20Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement.

Laitiers de hauts fourneaux :

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment [6]. Il montre par exemple que les laitiers de hauts fourneaux adsorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil.

Fumées de silice :

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Pour certains auteurs [23,25], elles augmentent les valeurs de seuil et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, alors que pour Khayat [18], par exemple, les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, certains auteurs montrent que l'utilisation de fumées de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

Filler calcaire :

Zhu et Gibbs [13], ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement et ce pour deux superplastifiants différents. En revanche, leur étude sur bétons montre que le type de filler a une forte influence sur la demande en superplastifiant (choisit dans leur étude) pour obtenir un étalement donné. Les fillers à base de craie nécessitent plus d'adjuvant que les fillers calcaires et ceci est particulièrement remarquable dans le cas où le niveau de remplacement est important. Les causes possibles de différences entre les comportements des fillers sont la présence d'impuretés, les différences entre les compacités et les possibles différences d'absorption entre les matériaux. Malgré cela, quelque soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiant pour atteindre un étalement donné.

L'addition minérale utilisée est la poudre de marbre (filler calcaire), de répartition granulaire 0/100 μm , 85.5% de passants à 63 μm , et de surface spécifique blaine 390 m^2/Kg , demande en eau de 23.5%. Elle répond aux exigences de la norme **p18-508** relative aux additions calcaires. La courbe granulaire de la poudre calcaire est donnée sur la figure III-4.

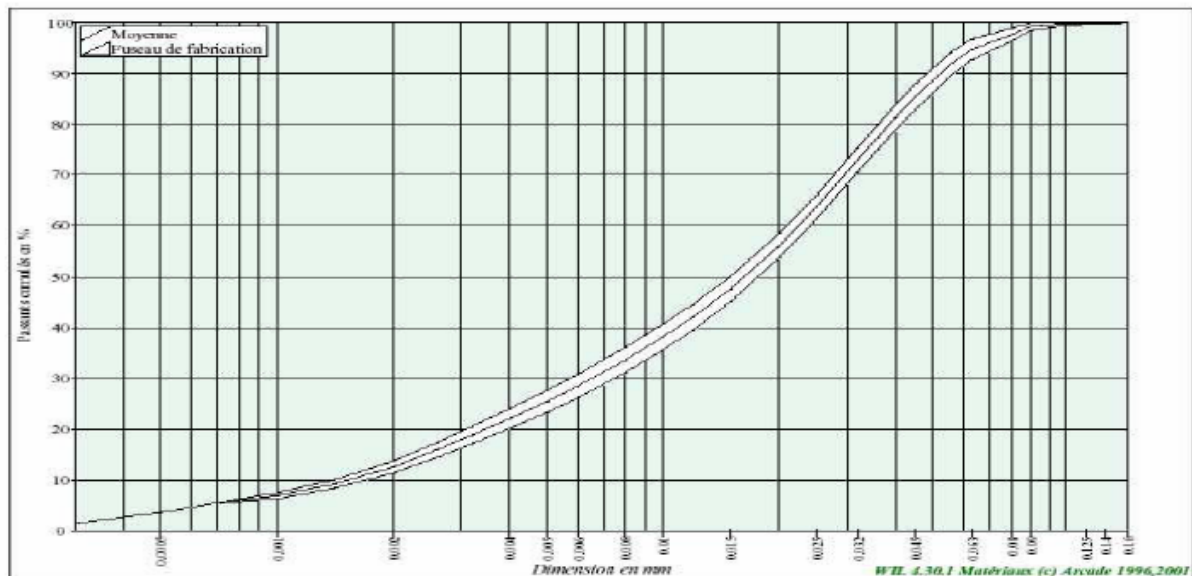


Figure III-4 : courbe granulaire de l'addition minérale

c) Ciments :

Le ciment utilisé dans les bétons est le CPA-CEMI 52.5R, ciment de très bonne qualité, couramment utilisé dans les constructions des bâtiments et les constructions d'ouvrages d'art. La composition chimique de ce ciment est donnée dans le tableau III-1.

	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF
CPA-CEMI 52.5 R	9.30	64.01	9.82	7.29

Tableau III-1 : Composition chimique du ciment utilisé

d) Adjuvants :

L'adjuvant utilisé dans, dans nos formulations, est :

- Un superplastifiant (fluidifiant) qui a un pouvoir défloculant puisque le béton autoplaçant renferme plus que 500kg/m³ de fines : SIKA 3030 à base de copolymère acrylique, et reste le plus utilisé pour la confection des bétons autoplaçants ; son mode d'action est à la fois électrostatique et stérique.

Les constituants sont regroupés dans le tableau III-2

Matériau	Origine	Masse volumique Kg/m ³
Ciment	CEM I 52.5R (Lafarge, Martres)	3100
Addition	Filler calcaire (classe M, la provencale)	2700
Sable	0/4 mm roulé alluvionnaire (garone)	2620
Gravier	4/10 mm roulé alluvionnaire (Garone)	2680
Superplastifiant	SIKA 3030 à bae de copolymère acrylique	1115

Tableau III-2 : Matériaux pour la fabrication des bétons

III-1-4 : Les Fibres :

Comme mentionné dans l'introduction, nous utiliserons 02 types de fibres chacune ayant une action différente au niveau de la matrice cimentaire.

Les caractéristiques des fibres utilisées sont regroupées dans le tableau III-3

Type de fibre	Métalliques SEVA	Polypropylène GRACE ou ADHERANTE
Longueur	30 mm	50 mm
Section transversale	Rectangulaire 1.6*0.03	Rectangulaire 1.6*0.4 mm
Densité	7.2	0.92
Résistance à la traction	2000MPa	310 Mpa
Module d'élasticité	140GPa	4.3 GPa

Tableau III-3 : Les fibres utilisées pour la formulation des BAP fibrés.

Les figures des photos III-1 et III-2, illustrent les différents types de fibres utilisés dans cette étude.

Les fibres métalliques sont, a priori, destinées à produire un effet local de couture des micro-fissures et les fibres synthétiques un effet plus global au niveau des macro-fissures et de la structure.



Photo III-1 : Fibres métalliques types fonte amorphe

On peut voir que la section transversale des fibres métalliques présente des dimensions qui donnent aux fibres des propriétés favorables de flexibilité. La surface des fibres n'est pas lisse, ce qui donne des bonnes conditions d'adhérence à la matrice du béton.



Photo III-2 : Fibres synthétiques type structural (GRACE)

REMARQUE :

Du renfort et de l'interface fibre-matrice, il convient d'optimiser chacun des constituants en assurant une synergie effective entre les deux. Le choix est fait de scinder l'étude de formulation en deux étapes : La première porte sur la définition d'une matrice autoplaçante de référence, la deuxième sur l'optimisation du renfort pour la matrice considérée. Une adaptation finale de la rhéologie est réalisée dans un troisième temps.

III-2 : Présentation de la démarche de formulation :

L'obtention d'une matrice extrêmement compacte conduit à des résistances en traction élevées, et donc à un ancrage mécanique optimal des fibres. La rhéologie autoplaçante de la matrice doit permettre d'enrober toutes les fibres lors du malaxage et sa viscosité de les entraîner lors de la mise en œuvre. A ce stade toute notre étude se déroule sans incorporation de fibres. Ce n'est qu'une fois la matrice formulée que les fibres sont incorporées au mélange en substitution du volume de granulats au volume de fibres introduit [57].

III-2-1 Cahier de charges.

On veut formuler des bétons autoplaçants fibrés, à partir des constituants explicités précédemment.

On optimisera quatre BAP avec différents dosages de fibres métalliques (5kg/m^3 , 10kg/m^3 , 15kg/m^3 , et 20kg/m^3) et deux BAP avec différents dosages de fibres synthétiques (4.5kg/m^3 , 9kg/m^3) et huit BAP avec des fibres hybrides (fibrage mixte) combinés avec les dosages respectifs.

La résistance visée à 28 jours est fixée dans une fourchette allant de 35 à 40 Mpa, ce qui correspond à une résistance caractéristique d'environ 30Mpa.

A l'état frais, on désire un étalement d'au moins 600mm avec une faible susceptibilité à la ségrégation.

Afin de mettre en avant le rôle joué par les fibres aussi bien sur l'écoulement du béton frais que sur le comportement mécanique à l'état durci, un BAP non fibré de même résistance à 28 jours que les BAP fibrés sera formulé.

On présentera d'abord les essais de caractérisation aux états frais et durci, qui permettent de valider le cahier des charges.

III-2-1-1 Essais de caractérisation à l'état frais :

Afin de valider l'autoplaçabilité des bétons, nous avons utilisé, conformément à ce qui a été décrit dans le chapitre précédent, les essais recommandés par l'AFGC [4].

Lors de leur mise en œuvre, Les bétons autoplaçants sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières.

S'il y a instabilité, c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de ségrégation dynamique. La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise. La ségrégation peut être nuisible aux résistances mécaniques mais également à la durabilité de la structure. Or elle n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de ressuage. Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du BAP et de disposer d'essais de vérification avant coulage.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser au comportement des BAP lors de l'écoulement. Différents essais de caractérisation seront présentés ainsi que les phénomènes pouvant conduire à une perte d'homogénéité du matériau. Les recommandations en terme de formulation seront abordées.

Dans une deuxième partie, nous étudierons plus précisément la ségrégation statique à travers les essais et les études disponibles pour caractériser ce phénomène. L'implication en terme de formulation sera également prise en compte.

a) Essai d'étalement au cône d'Abrams (Slump Flow):(milieu non confiné) :

Cet essai permet d'apprécier les propriétés conjuguées de fluidité et d'homogénéité du matériau. On vérifie que les fibres sont correctement entraînées dans l'écoulement en jugeant de leur distribution plus ou moins uniforme dans la galette d'étalement. Les conditions de l'essai sont celles prescrites par l'AFGC [4]. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimensions suffisante ($> 800 * 800$ mm), puis il est rempli de béton autoplaçant. Le cône est ensuite soulevé et le béton autoplaçant en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut- être évalué qualitativement. Les granulats

grossiers avec les fibres devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette comme le montre la figure de la photo III-3.



Photo III-3 : Détermination de l'étalement (Slump Flow).

b) Essai de la boîte en L (L-BOX) :

La procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante : la partie verticale de la boîte est remplie de béton. Ensuite le volet est soulevé, ce qui provoque l'écoulement du béton qui doit passer au travers d'un grillage, formé de 03 barres d'armatures Ø 16mm distantes de 50 mm, avant de pouvoir atteindre la partie horizontale de la boîte. On mesure le temps nécessaire dès l'ouverture du volet jusqu'à la fin de l'écoulement du béton dans la partie horizontale. Ce temps d'écoulement devrait être compris entre 3 et 7 secondes. On peut aussi mesurer la hauteur atteinte aux deux extrémités de la partie horizontale par le béton (h_1 et h_2), afin de qualifier sa capacité d'autonivellement, comme montré sur la figure de la photo III-4. Le rapport h_2/h_1 devrait être supérieur à 0,8. L'essai permet en outre de vérifier la capacité du béton à s'écouler au travers d'un réseau d'armatures d'écartement défini, de tester la mobilité du béton en milieu confiné, et enfin de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage, comme montré sur la photo de la figure III-4.

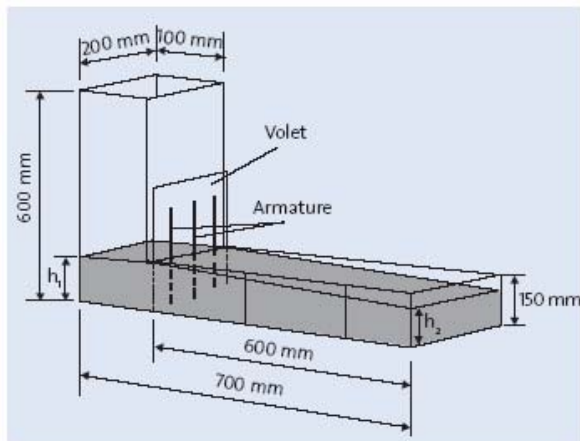


Photo III-4 : Représentation schématique et photographique de l'essai de la boîte en L.

c) Essai d'étalement modifié (J-Ring) :

L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300mm de diamètre sont soudées des barres \varnothing 16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton autoplaçant satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

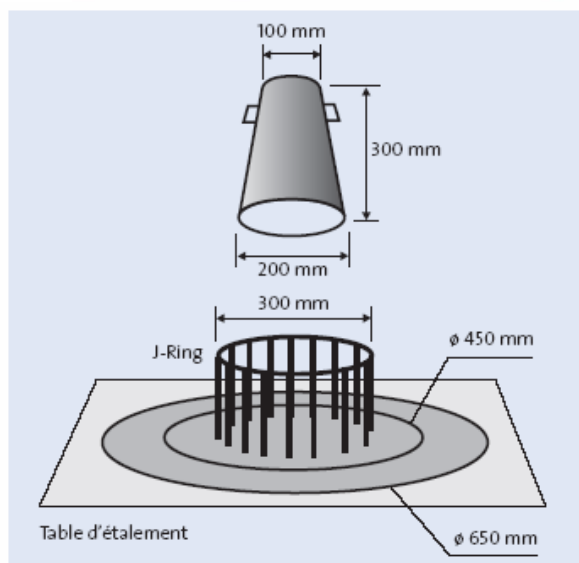
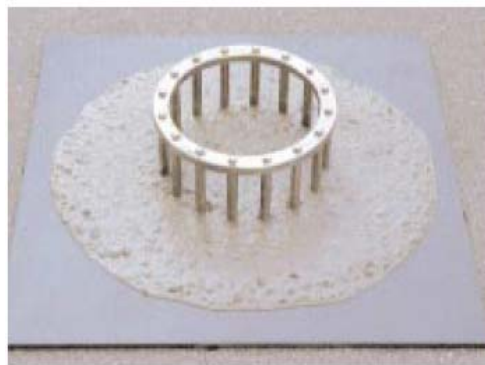


Photo III-5 : Dispositif de l'essai d'étalement modifié (J-Ring)

III-3 : Principales étapes d'optimisation des BAP à fibrages mixtes (hybrides) :

Notre objectif est l'incorporation des fibres métalliques et synthétiques dans une matrice cimenteuse autoplaçante dont le plus gros granulat n'excède pas 10 mm. Le problème souvent rencontré est alors une rhéologie détestable, quand ce n'est pas une impossibilité de fabrication ! En effet les fibres modifient et desserrent l'empilement granulaire, essentiellement quand la longueur de la fibre est du même ordre de grandeur que le diamètre des granulats [57], ce qui n'est pas le cas pour nos bétons autoplaçants.

Avec des longueurs variant entre 30 mm (fibres métalliques) et 50 mm (fibres synthétiques), les fibres utilisées dans cette étude perturbent beaucoup moins l'empilement granulaire puisque de 3 à 5 fois plus longues que le plus gros granulat avec des dosages relativement faibles de 5 Kg/m³ à 20 Kg/m³ pour les fibres métalliques et de 4,5 Kg/m³ à 9Kg/m³ pour les fibres synthétiques. A leurs tours ces dosages mono fibrés seront combinés afin de formuler des mélanges mixtes (hybrides).

III-4 : COMPOSITIONS OPTIMISEES :

Tenant compte des études préliminaires, présentées aux paragraphes précédents et des paramètres de composition prépondérants mis en évidence et vérifiés aux cours des essais de validation, on présente les différentes formulations optimisées dans le Tableau III-2.

Les dénominations abrégées de nos bétons sont constituées de la manière suivante :

- Préfixe BAP : Béton Auto-Plaçant
- Suffixe FM : Fibres Métalliques seules
- Suffixe FS : Fibres Synthétiques seules
- Suffixe FMS : Fibres Métalliques et Synthétiques mélangées.

Type de béton	composition								Propriétés état frais	
	C(kg/m ³)	F(kg/m ³)	S(kg/m ³)	G(kg/m ³)	SP(kg/m ³)	E(l/m ³)	FM(kg/m ³)	FS(kg/m ³)	D(cm)	H1/H2
BAP	310	170	820	860	3.1	180	0	0	68	1
Bapfm1	340	213	884	553	4.08	183	5	0	67	0.8
Bapfm2	340	213	884	553	4.08	183	10	0	65	0.8
Bapfm3	340	213	884	553	4.08	185	15	0	66	0.8
Bapfm4	340	213	884	553	4.08	186	20	0	65	0.8
Bapfs1	340	216	884	620	4.08	186	0	4.5	66	0.8
Bapfs2	340	216	884	620	4.08	188	0	9	65	0.8
Bapfms1	340	213	884	553	4.6	188	5	4.5	65	0.8
Bapfms2	340	213	884	553	4.6	188	10	4.5	65	0.8
Bapfms3	340	213	884	553	4.6	188	15	4.5	65	0.8
Bapfms4	340	213	884	553	4.6	190	20	4.5	65	0.8
Bapfms5	340	213	884	553	5	195	5	9	64	0.8

Bapfms6	340	213	884	553	5	200	10	9	64	0.8
Bapfms7	340	213	884	553	5	200	15	9	64	0.8
Bapfms8	340	213	884	884	5	205	20	9	64	0.7

Tableau III-4 : Compositions des différents mélanges Optimisées

III-5 : Fabrications des bétons – Séquence de malaxage – Conservation des éprouvettes :

On a observé que les fibres ne se répartissaient pas correctement lorsqu'elles étaient incorporées après l'ajout d'eau et qu'elles pouvaient former localement des oursins. La raison pour laquelle, la procédure de malaxage a été modifiée pour les compositions optimisées (mono fibrés et bi fibrés).

La séquence de malaxage employée dans ce cas est donc la suivante :

1. Incorporation des gros gravillons, du ciment, du filler et du sable, et malaxage durant 30 secondes.
2. Ajout des fibres métalliques et malaxage pour 60 secondes.
3. Ajout de l'eau d'apport et du superplastifiant dilué dans l'eau, et malaxage pendant 210 secondes.

La durée effective du malaxage est donc de 5 minutes.

Après la réalisation des essais d'ouvrabilité, les bétons ont été remalaxés pendant 1 minute, puis déchargés dans une brouette pour la mise en place dans les moules. Le moules remplis ont été immédiatement couverts, placés à $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}$, puis les éprouvettes ont été démoulées à l'échéance de 24h après le coulage. Enfin, elles ont été stockées dans une salle à 90% d'humidité relative, jusqu'aux échéances d'essai mécanique (28 jours).

CHAPITRE IV
COMPORTEMENT MECANIQUE
DES BETONS AUTOPLACANTS
ET
BETONS AUTOPLACANTS FIBRE

IV- COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS AUTOPLACANTS ET BETONS AUTOPLACANTS FIBRES :

IV-1 : Dispositifs expérimentaux :

Nos bétons, dont la composition a été optimisée pour répondre au cahier des charges minimal : mise en place satisfaisante du béton frais et caractéristiques mécaniques de base garanties, vont être étudiés plus en détail du point de vue de leur comportement mécanique. Nous allons notamment nous intéresser à leur comportement en compression, traction et particulièrement en flexion afin d'en déduire les indices de ténacité et les énergies mises en œuvre lors de la rupture.

Les éprouvettes pour les essais en compression simple sont cylindriques, de diamètre 12 cm et de hauteur 24 cm rectifiée avec un disque diamanté. L'effort est appliqué par une presse hydraulique de 3000 KN, dont le chargement est contrôlé en force, à raison de 0,5 à 0,7 Kn par seconde. La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 12*24 cm par des essais de fendage. Le module de Young des bétons est mesuré lors d'essais de compression sur des éprouvettes 12*24 cm équipées de 05 jauges (03 pour les déformations longitudinales et 02 pour les déformations transversales). Le module, noté E , est déduit de la pente contrainte -déformation en pré-pic ; le chargement maximal est d'environ 30% de la résistance du béton. Celles pour les essais de flexion sont prismatiques de section 15 cm par 15 cm et de longueur 55 cm et ce conformément à la norme européenne NF EN 14651 de Novembre 2005 qui spécifie la méthode de mesurage, sur des éprouvettes moulées, de la résistance à la traction par flexion des bétons de fibres métalliques. La méthode permet de déterminer la limite de proportionnalité (LOP) et un ensemble de valeurs de la résistance résiduelle à la traction par flexion.

Cette méthode d'essai est conçue pour les fibres métalliques d'une longueur maximale de 60 mm.

Cette méthode peut également être appliquée pour une combinaison de fibres métalliques et pour une combinaison de fibres métalliques avec d'autres fibres [58].

IV-2 : COMPORTEMENT EN COMPRESSION SIMPLE :

IV-2-1 : INTRODUCTION :

Même s'il est des applications où il convient de modérer le poids que l'on lui accorde, la résistance en compression est traditionnellement la caractéristique de référence des matériaux cimentaires. Depuis des décennies, la plupart des investigations ont eu pour objectif

d'améliorer cette résistance : il en a résulté les bétons à hautes performances et les bétons à ultra hautes performances.

En vue des objectifs visés dans ce travail, Nous allons étudier le comportement en compression simple des compositions fibrés que nous avons retenues. La résistance, le module d'élasticité et le coefficient de poisson seront évalués. Le comportement post-pic et le mode de ruine seront également décrits. Nous tirerons la conclusion quant à l'influence des fibres métalliques et des fibres synthétiques ou de leur association sur la capacité de déformation de ces composites cimentaires.

IV-2-2 : RESISTANCE ET MODULE D'ELASTICITE EN COMPRESSION :

IV-2-2-1 : Dispositif expérimental et spécimens étudiés :

Nous avons utilisés des éprouvettes cylindriques de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm. Leur confection a été décrite au chapitre précédent. Elles ont été démoulées au bout de 24 h et conservées dans une chambre à 20°C et à 100% d'humidité relative pendant 28 jours.

La rectification des bases des cylindres est réalisée par enduit au moyen d'un mélange fondu de fleur de soufre et de sable siliceux fin appliqué par l'intermédiaire d'un dispositif assurant la planéité des faces et leur perpendicularité par rapport à la génératrice. La presse utilisée est d'une capacité de 3000KN, et à pilotage automatique.



Photo IV-1 : Presse utilisée pour les essais de compression et traction par fendage

La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406.

Pour évaluer le module d'élasticité, trois jauges extenso métriques de base de mesure 3cm sont collées longitudinalement sur la surface latérale de l'éprouvette cylindrique à 120°, afin de s'affranchir des effets de flexion éventuels. Nous avons respecté les recommandations RILEM [59], applicables à tout type de granulats (légers, normaux, lourds) qui consistent à effectuer des cycles de charges et décharges.

IV-2-2-2 : Résultats et discussions :

a) Bétons autoplaçants avec fibres métalliques :

Le tableau IV-1 et la courbe de la figure IV-1 illustrent l'influence du renfort en fibres sur la résistance en compression. Chaque valeur est une moyenne des résultats obtenus sur trois essais. La composition de la matrice cimenteuse autoplaçante répond à des exigences de compacité et de fluidité, la résistance en compression n'étant que le résultat et non le but de notre démarche. L'optimisation du renfort s'appuie sur l'analyse du processus de fissuration en post pic pour les différentes compositions optimisées.

La résistance du composite est avant tout régie par le comportement mécanique de l'interface fibre-matrice. La fibre doit être correctement enrobée par la pâte, faute de quoi elle ne travaillera pas de manière optimale. Plus le pourcentage de fibres, c'est leur nombre qui importe, surtout lorsqu'il s'agit de volumes très faibles (<1%). Notons que la meilleure performance a été donnée pour un dosage de 20Kg/m³.

■ Cas de la fissuration gouvernée par des contraintes macroscopiques de compression :

Dans le paragraphe précédent, il a été dit que les fissures verticales ne sont pas actives au sens où elles n'interviennent pas directement dans le passage du comportement du matériau au comportement de structure. Ce sont, au contraire, elles qui sont à l'origine des fissures obliques qui sont considérées comme actives.

En retardant la propagation des fissures verticales, les fibres métalliques pourraient donc retarder l'apparition des fissures obliques et, ainsi, augmenter la résistance en compression du béton. En fait si l'on se réfère aux travaux de Rossi [25], on s'aperçoit que, pour ce faire, il faudrait que les fibres interviennent à une échelle très petite par rapport à la taille des plus gros granulats du béton, en l'occurrence à l'échelle de la pâte de ciment, et que le pourcentage introduit soit si élevé que ce soit peu réaliste d'un point de vue économique.

Les résultats confirment ceux que nous avons présentés à la bibliographie [25]. L'incorporation des fibres à faible dosage affecte peu la résistance en compression, la

sollicitation n'est pas adaptée afin que les fibres contribuent à transférer des contraintes lorsqu'une charge extérieure est appliquée. La résistance en compression est du même ordre de grandeur pour tous les dosages comme le montre la courbe de la figure IV-1.

	BAP	BAPFM1	BAPFM2	BAPFM3	BAPFM4
F_{t28j} (Mpa)	5,43	5,49	5,53	5,67	5,68
R_{c28j} (Mpa)	43,14	43,09	43,97	44,12	44,62

Tableau IV-1 : Influence du dosage en fibres sur la résistance en compression

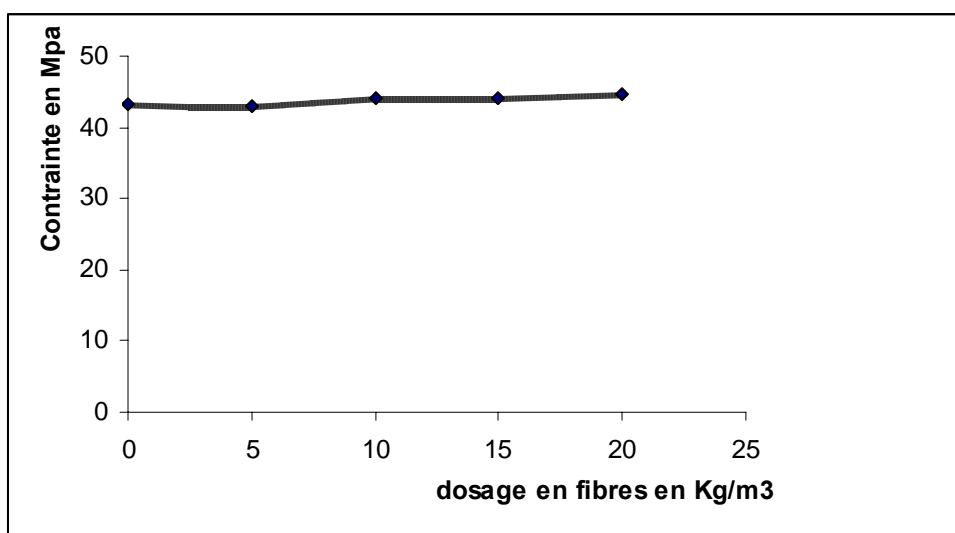


Figure IV-1 : Variation de la contrainte de compression en fonction du dosage en fibres

Le tableau IV-1 montre, pour chacun des mélanges de béton autoplaçant, les résistances en compression qui ont été mesurées à 28 jours. On constate d'abord que la résistance à la compression la même quel que soit le dosages en fibres et que, à 28 jours, les bétons autoplaçants fibrés et non fibrés possèdent une résistance à la compression de l'ordre de 45 Mpa. Il est intéressant de noter qu'à 14 jours d'âge, la résistance à la compression atteint 90% de la résistance à 28 jours. Ces bétons sont donc bien adaptés aux constructions où l'ouvrage doit être mis en service très rapidement.

b) Bétons autoplaçants avec fibres synthétiques :

	BAP	BAPFS1	BAPFS2
F_{t28j} (Mpa)	5,43	5,53	5,80
R_{c28j} (Mpa)	43,16	44,31	45,08

Tableau IV-2: Influence du dosage en fibres sur la résistance en compression

Concernant la variation de la résistance, en compression, les mêmes remarques ont été tirées. Cependant, en post-ruine les bétons autoplaçants avec 9Kg/m^3 ont eu un nombre plus élevé de fissures, et ceci a impliqué la présence de fissures plus fines, comme déjà décrites par certains auteurs et reportées dans les ouvrages des bétons de fibres [25].

On peut tout de même souligner que, puisque les microfissures verticales sont créées par des contraintes de traction (générées à l'échelle de la pâte de ciment par le caractère hétérogène du béton, et par la différence de raideur entre les granulats et la pâte de ciment), les fibres synthétiques vont introduire une hétérogénéité supplémentaire, pouvant également être à l'origine de microfissures verticales. Le bilan entre l'aspect positif (reprise des efforts par l'intermédiaire de ces fibres polypropylènes), et l'aspect négatif (créer de nouvelles microfissures verticales) ne serait pas alors évident.

Concernant les fissures obliques, on peut reprendre et appliquer tout ce qui a été présenté concernant les deux échelles (matériau et structure) d'action des fibres vis-à-vis des fissures de traction, ceci à une nuance près : dans le cas des fissures obliques, les fibres synthétiques s'opposent non pas aux déplacements normaux des lèvres de la fissure, comme pour les fissures de traction, mais principalement aux déplacements tangentiels de ces lèvres de fissure. Or, les fibres ayant une rigidité de flexion moins importante qu'en traction, leur efficacité mécanique sera moindre vis-à-vis des fissures obliques de compression que vis-à-vis des fissures obliques de traction uniaxiale, et ceci explique la variation pseudo constante de la contrainte de compression (Fig IV-2).

On peut également noter que, lorsque les lèvres des fissures obliques subissent des déplacements tangentiels, elles induisent des déplacements normaux au niveau des lèvres des fissures verticales, qui d'inactives deviennent actives. Pour des raisons géométriques, il est évident que, pour obtenir des déplacements normaux au niveau des lèvres des fissures verticales qui soient de même ordre de grandeur que ceux relatifs aux microfissures obtenues en traction uniaxiale, il est nécessaire que les déplacements tangentiels au niveau des fissures

obliques soient importants, et donc que l'on soit passé du comportement de matériau au comportement de structure.

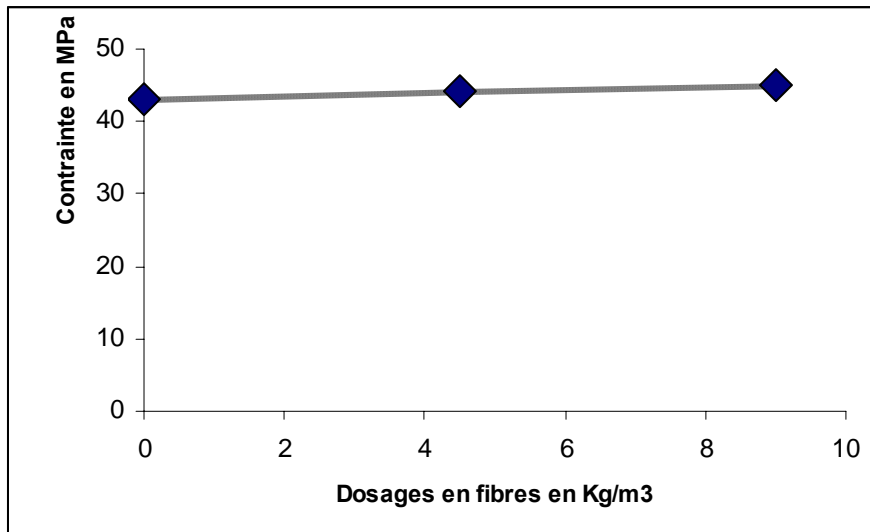


Figure IV-2 : Variation de la contrainte de compression en fonction du dosage en fibres

c) bétons autoplaçants à fibrage mixte :

	BAP	BAPFMS1	BAPFMS2	BAPFMS3	BAPFMS4	BAPFMS5	BAPFMS6	BAPFMS7	BAPFMS8
$F_{t28j}(Mpa)$	5,43	5,50	5,54	5,54	5,57	5,82	5,88	5,78	5,71
$R_{c28j}(Mpa)$	43,16	46,80	46,56	46,87	46,67	49,07	52,64	51,76	50,98

Tableau IV-3 : Influence du fibrage mixte sur l'évolution de la résistance en compression

IV-3 : COMPORTEMENT EN TRACTION SIMPLE (par fendage) :

IV-3-1 : INTRODUCTION :

Cet essai est appelé aussi résistance à la compression par écrasement latéral (essai brésilien). Toutefois, la mécanique de rupture de l'essai brésilien limite l'interprétation de ces résultats. L'essai se réalisant par fendage, les fibres sont sollicitées en traction une fois la matrice du béton fracturée. Il est toutefois plus réaliste de considérer que l'augmentation de la résistance est un indice du gain de la ténacité du béton une fois la rupture du béton atteinte. L'essai par traction directe est un meilleur indicateur de la résistance en tension réelle du béton.

La plupart des pathologies des matériaux cimentaires sont liées directement ou indirectement à leur faible performance en traction et à la fissuration qui en découle. Si tel est le cas, pourquoi assiste-t-on à un statut quo dans la caractérisation des matériaux cimentaires où la résistance à la compression demeure une priorité alors que les propriétés en traction sont plus importantes à mettre en évidence ? D'après Vaysburd et al [60], c'est simplement parce que les essais en compression sont plus faciles à réaliser. Les auteurs caricaturent ce constat à travers l'image d'un homme soûl recherchant son portefeuille sous un lampadaire de rue non pas parce qu'il pense l'avoir perdu à cet endroit mais uniquement parce que c'est le seul endroit éclairé !

L'introduction des fibres discontinues dans les bétons autoplaçants a pour objectif de contrôler la fissuration. En effet, le rôle des fibres est de reprendre des efforts de traction au sein de la matrice cimentaire afin de retarder l'initiation puis la propagation instable des fissures. Les fibres peuvent ainsi augmenter la résistance à la traction, mais aussi la ductilité des bétons autoplaçants. Dans ces bétons, l'orientation perpendiculaire des fissures aux interfaces matrice-granulats devrait permettre aux fibres d'agir efficacement.

On distingue deux principaux types de fibres : les fibres métalliques (fonte amorphe) et les fibres synthétiques (polypropylène). Ces fibres jouent deux rôles bien distincts dans le processus de fissuration du béton qui comporte trois étapes : la microfissuration, la localisation et la propagation des fissures menant à la rupture (Figure IV-3)

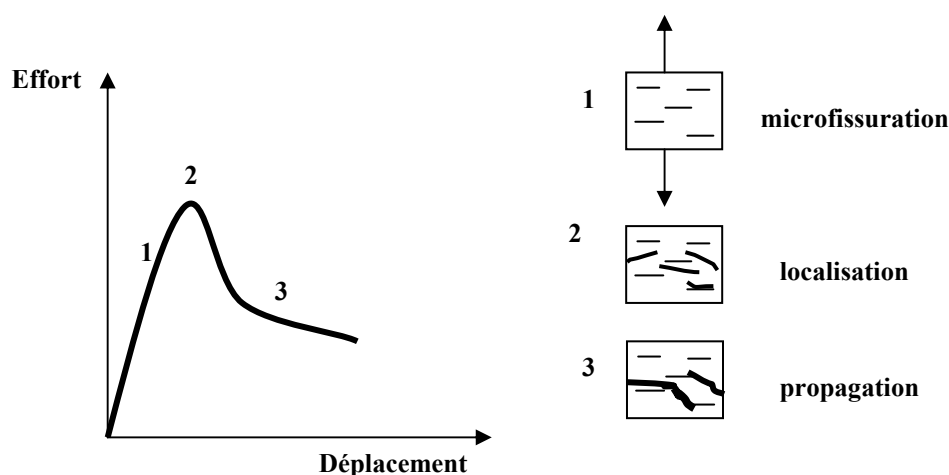


Figure IV-3 : Représentation schématique du processus de fissuration

Seules les fibres métalliques (petites), peuvent être utilisées en grande quantité sans affecter la maniabilité, et peuvent apporter une amélioration des caractéristiques intrinsèques du matériau en retardant la coalescence des microfissures puis la localisation des fissures (passage de l'étape 1 à 2). En revanche, le pontage des fissures de l'étape 3 ne peut être assuré que par des fibres longues en l'occurrence fibres synthétiques. Ces dernières, en mobilisant un ancrage efficace, permettent ainsi de contrôler la propagation des fissures. Leur effet se traduit alors par une augmentation de la ductilité des structures soumises à des efforts de traction.

Compte tenu du rôle des fibres dans la matrice cimentuse, nous pouvons nous attendre à ce que l'incorporation des fibres aurait un impact prépondérant dans le comportement en traction.

L'élaboration du concept de fibrage mixte ou hybride a permis d'aboutir à une compréhension claire de l'intervention des fibres dans les différentes étapes du processus de fissuration en traction d'un composite cimentaire fibré. Ce concept peut se résumer ainsi :
Durant les 02 étapes de fissuration évoquées précédemment les fibres interviennent de la manière suivante :

- Durant la phase de microfissuration diffuse, les fibres métalliques peuvent « coudre » les microfissures actives et retarder l'apparition de la localisation. On observe alors une augmentation de la capacité portante à l'échelle du matériau.
- Durant la phase de propagation des macrofissures actives, les fibres synthétiques peuvent également « coudre » ces macrofissures, assurant, ainsi, une ductilité plus grande à l'échelle de la structure.

Il est bien évident que, dans la plupart des cas, la géométrie optimale de la fibre qu'il faut utiliser pour agir sur la micro ou sur la macrofissuration active sera différente. En effet, dans le cas où les fibres doivent agir sur les microfissures, il est nécessaire que ces fibres soient nombreuses et de petit diamètre. Pour des raisons de maniabilité (étalement à l'état frais) du matériau, fortement liée au rapport *longueur/diamètre* de la fibre, les fibres devront également être relativement courtes.

Dans le cas où l'on veut que les fibres agissent sur les macrofissures, la longueur de la fibre doit être suffisamment grande, comme c'est le cas des fibres synthétiques ($l=50\text{mm}$), afin d'assurer un ancrage suffisant de celle ci dans la matrice. Pour les mêmes raisons de maniabilité, les fibres longues ne pourront s'utiliser qu'en pourcentage beaucoup plus faible que les fibres courtes.

Il faut noter que ce qui précède relève de « règles générales », auxquelles il faut apporter quelques nuances :

- Ce respect du pourcentage important de fibres courtes ou du pourcentage faible de fibres longues n'est vrai que si la maniabilité est un paramètre important dans la formulation et la mise en œuvre du béton, ce qui est le cas puisqu'il s'agit de béton autoplaçant. Dans le cas où cette maniabilité n'est pas un paramètre important, comme par exemple le cas des bétons vibrés ou d'un béton sec, on peut introduire un pourcentage élevé de fibres longues et de faible diamètre, ce qui permet d'agir l'échelle du matériau et à l'échelle de la structure.
- La longueur de la fibre à utiliser est fortement dépendante des caractéristiques mécaniques de la matrice. Ainsi, si la matrice est très compacte et très adhérente aux fibres, une fibre considérée comme courte pourrait à priori agir correctement à la fois au niveau des micro et macrofissures.

■ ***Cas où la résistance de l'interface matrice- granulat est inférieure à la résistance du granulat et à celle de la matrice***

Dans ce cas, la rupture en traction est intergranulaire. Les fissures démarrent au niveau des interfaces, avant de pénétrer dans la matrice, ce qui conduit à une propagation de fissure d'interface à interface. Si, alors, les fibres ont une longueur proche du diamètre des plus gros granulats, celles qui seront juste à côté de ces granulats peuvent ne pas, ou très mal, « intercepter » les fissures intergranulaires, comme le montre le schéma de la figure IV-4

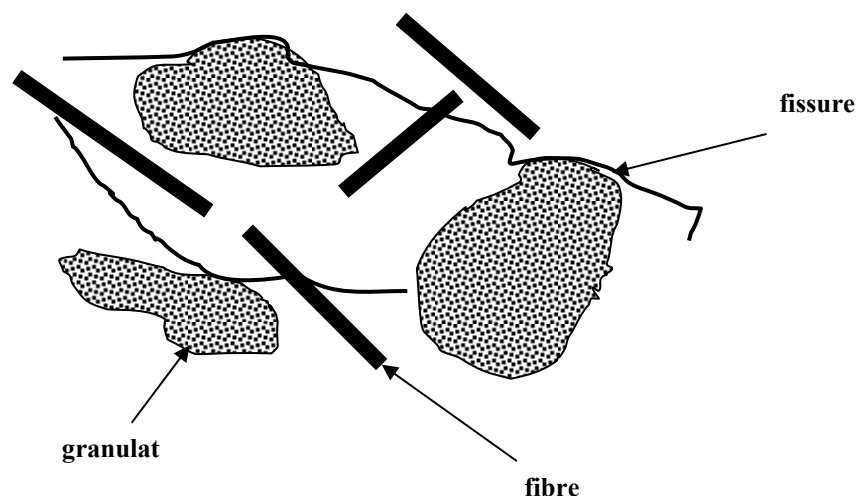


Figure IV-4 : Fissuration intergranulaire

Pour que les fibres aient une chance d'agir efficacement au niveau des fissures intergranulaires et interviennent à l'échelle d'une structure dont les dimensions sont très grandes par rapport au diamètre du plus gros granulat, il est impératif que la longueur de la fibre soit plus grande que ce diamètre, un rapport de deux à trois étant préconisé dans la littérature. Ceci étant lié au problème d'effet d'échelle. Lorsque les dimensions de la structure sont d'un ordre de grandeur proche du diamètre du plus gros granulats, le rapport longueur de la *fibre/diamètre* du granulat n'est plus à prendre en considération.

■ ***Cas où la résistance matrice-granulat n'est pas une zone de plus faible résistance :***

Dans ce cas, la rupture est intergranulaire, les fissures traversant indifféremment la matrice et les granulats. Les bétons autoplaçants, dont la résistance en compression avoisine les 45 Mpa, ainsi que les bétons vibrés sont le siège de rupture intergranulaire. Le rapport longueur de la *fibre/diamètre* du granulat n'est pas, alors, un paramètre important.

Un dernier facteur intervient dans le choix entre fibre courte et fibre longue, c'est *l'effet d'échelle*.

Ce problème se rencontre dans le cas où la fissuration est localisée à l'échelle de la structure. Ainsi, pour des raisons géométriques évidentes, pour un type de structure et pour un type de sollicitation donnés, l'ouverture de la fissure va dépendre des dimensions de la structure. Par conséquent, une fibre peut être efficace à l'échelle de cette structure, et ne plus l'être si l'on augmente les dimensions de celle-ci. C'est la raison pour laquelle, lorsqu'on désire intervenir à l'échelle d'une structure dont les dimensions sont grandes par rapport au diamètre du granulat, la longueur de la fibre doit être deux à trois fois plus grande que le diamètre du plus gros granulat.

Ainsi, les fibres qui ne peuvent pas intervenir de manière réaliste lors de la création des fissures verticales, peuvent intervenir de manière indirecte sur l'évolution des fissures obliques, en agissant sur l'ouverture des fissures verticales. En conséquence, on se trouve confronté à deux cas de figure :

- 1) On introduit une quantité élevée de fibres courtes (fonte amorphe) : dans ce cas, les fibres interviennent au niveau des microfissures obliques, mais pas au niveau des fissures verticales qui ne s'ouvrent pratiquement pas. Par conséquent si l'on se réfère au fait que les fibres sont mécaniquement moins efficaces vis-à-vis des fissures obliques de compression (déplacements tangentiels) que vis-à-vis des fissures de traction (déplacements normaux), l'introduction d'un pourcentage élevé

de fibres courtes augmente moins les résistances en compression que les résistances en traction.

- 2) On introduit une quantité plus faible de fibres longues (polypropylènes). Dans ce cas, les fibres interviennent au niveau des macrofissures obliques et verticales. Elles permettent alors d'augmenter la capacité portante et la ductilité à l'échelle de la structure.

■ *Cas des sollicitations multiaxiales*

Comme il a été précisé au début du chapitre, quel que soit le type de structure ou de sollicitation, le processus de fissuration du béton autoplaçant fibré tout comme le béton vibré est gouverné par des contraintes macroscopiques de traction et/ou de compression, les contraintes de compression macroscopiques se traduisant d'ailleurs par des contraintes de traction locales, créant les fissures. La seule différence entre traction et compression se résume au fait que, dans le cas de la traction, les fissures s'ouvrent en mode I (déplacements normaux des lèvres de la fissure) alors que, dans le cas de la compression, les lèvres de fissures se déplacent surtout en mode II (déplacements tangentiels des lèvres) et activent des frottements importants. Pour ce qui concerne les contraintes de cisaillement macroscopiques, il en est de même que pour la compression : elles se traduisent localement par de la traction créant les fissures. Au contraire, dans le cas du cisaillement, les fissures s'ouvrent d'abord en mode I (principalement), puis les lèvres de ces fissures se déplacent en mode II. Ce déplacement en mode II ne provoque pas de frottement, les fissures étant ouvertes, mais plutôt des effets d'engrènement à l'échelle de la structure, dus à des chemins « tortueux » de fissures, provoquant des contacts ponctuels entre leurs lèvres.

Dans le cas des sollicitations multiaxiales, ces différents mécanismes peuvent être présents, mais de manière plus ou moins intense. On aura ainsi, suivant le type de sollicitation multiaxiale, plus ou moins de fissures s'ouvrant en mode I, plus ou moins de déplacements en mode II, plus ou moins de frottements ou d'effets d'engrènements. Il est donc inutile et fastidieux de passer en revue le comportement mécanique des bétons autoplaçants à fibrage mixte pour tous les types de sollicitation multiaxiale qui leur sont appliqués. Il est plus intéressant de signaler quelles sont les situations dans lesquelles les bétons autoplaçants fibrés se comportent bien du point de vue mécanique.

Le premier point à souligner est que les sollicitations multiaxiales induisent, généralement, une multifissuration constituée de fissures plus fines que dans le cas des sollicitations uniaxiales. Si, par conséquent, on tient compte du fait que, d'une part, plus il y a de fissures,

plus la probabilité que les fibres soient actives est grande, et que, d'autre part, plus les fissures sont fines, plus les fibres sont efficaces, alors on peut postuler que les bétons autoplaçants fibrés se comporteront généralement mieux sous sollicitations multiaxiales que sous sollicitations uniaxiales.

L'avantage majeur que procurent les fibres en général réside sans aucun doute dans le fait qu'elles permettent d'accroître de façon importante la résistance à la traction ou à la flexion des composites cimentaires en prévenant la formation, la propagation et la coalescence des microfissures. Des simulations numériques par éléments finis [61]ont d'ailleurs démontré que les gains de résistance observés sont principalement attribuables à l'effet de pincement que procurent les fibres métalliques d'abord et synthétiques après à la pointe des fissures. Cet effet de pincement a pour la première fois été proposé par Romualdi et Batson en 1963 ; mais dans le cas des bétons armés de macrofibres métalliques, cet effet est négligeable car les dosages en fibres sont généralement trop faibles (moins de 1% en volume). L'ajout de microfibres modifie aussi le module élastique et la ténacité de la matrice autoplaçante, en plus de réduire considérablement l'influence néfaste du séchage sur le comportement mécanique de cette dernière.

Les résultats des tableaux IV-1, IV-2 et IV-3 donne une idée sur l'évolution de la résistance en traction pour différents dosages en fibres.

IV-4 : COMPORTEMENT EN FLEXION :

IV-4-1 : INTRODUCTION :

Les essais de traction par flexion sont généralement préférés aux essais de traction simple car ils sont plus aisés à réaliser et techniquement plus faciles à contrôler notamment dans le cas d'un asservissement à vitesse de déplacement imposée. Dans le cadre de ce travail, nous avons évalué le comportement en flexion trois points afin de compléter les résultats obtenus en traction par fendage.

Comme dans les sous chapitres précédents, nous avons porté une attention particulière à l'influence des fibres métalliques et synthétiques sur la capacité maximale de rupture, nous attacherons ici à la flèche associée au pic de charge.

Nous allons aussi voir le rôle du renfort en fibres et l'efficacité de leurs mélanges (hybrides) sur la capacité portante et le comportement post-fissuration. Enfin, et dans le même contexte, nous avons confronté l'approche mécanique et l'approche énergétique.

Ces essais de flexion trois points [58] (*norme NF EN 14651*) ont été réalisés afin d'évaluer le comportement en flexion des bétons mono fibrés et bi fibrés. Ces essais sont importants car

ils reproduisent bien le mode sollicitation auxquelles les poutres (éprouvettes) seront exposées. Pour chaque mélange de béton, trois éprouvettes de 150*150*550 mm ont été soumises aux essais de flexion après 28 jours de cure humide.

IV-4-2 : ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS :

IV-4-2-1 : Dispositif expérimental :

Les essais ont été pratiqués sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 150x150x550 mm. Ces dernières ont été démoulées 24h après la mise en place du composite cimentaire puis conservées dans les mêmes conditions que les éprouvettes de compression et traction, jusqu'au 28^{ème} jour, échéance des essais.

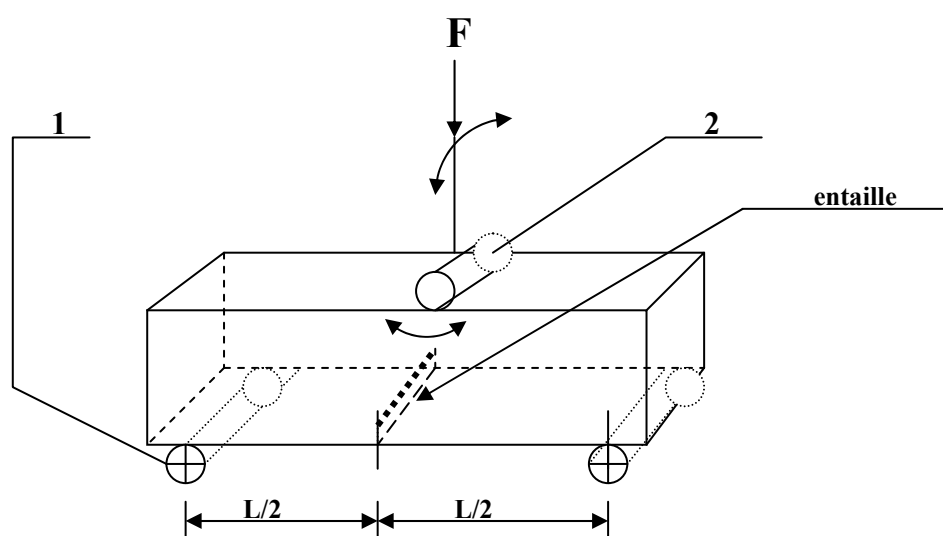


Fig IV-5 : Configuration du dispositif du chargement de l'éprouvette

1 : Rouleau d'appui

2 : Rouleau de chargement

Les rouleaux doivent tous être en acier et avoir une section circulaire de 30mm±1mm de diamètre. Leur longueur doit être supérieure d'au moins 10 mm à la largeur de l'éprouvette. Leur surface doit être propre et lisse

Deux rouleaux, dont le rouleau supérieur, doivent pouvoir tourner librement autour de leur axe et être inclinables dans un plan perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'éprouvette.

La distance entre les centres des 02 rouleaux d'appui (c'est à dire la portée) doit être égale à 500 mm. Les rouleaux doivent tous être réglés sur leur position correcte, toutes les distances ayant une exactitude de $\pm 2,0$ mm.

IV-4-2-2 : Mesure des paramètres à la rupture

Les paramètres à la rupture LOP (limite de proportionnalité) et le CMOD (déplacement du bord de la fissure) sont à mesurer par des essais de flexion 03 points sur des poutres. Nous avons choisi la méthode développée par l'Association Française de Normalisation et recommandée par la EN sous le n° 14651 [58], au détriment de la méthode d'effet d'échelle, également recommandée.

L'essai est réalisé sur des poutres de longueur 55 cm, et 15 cm de hauteur et largeur, posée sur deux appuis distants de 50 cm. Les poutres présentent à mi-longueur une entaille de 2,5 cm de profondeur créée par une scie circulaire à lame carborundum, avec une profondeur de coupe réglable à une valeur fixée et une direction de coupe orientée à 90° par rapport à la longueur de l'éprouvette.



Fig IV-6 : Plaques métalliques servant de support pour le capteur

Au cours de l'essai, on charge la poutre en contrôlant l'ouverture de l'entaille (et donc la propagation de la fissure). L'ouverture de l'entaille, notée CMOD (crack mouth opening displacement), est mesurée par un capteur supporté par deux plaques métalliques collées sous

la poutre de chaque côté de l'entaille (fig IV-6). La presse de capacité 150KN est équipée par un servo-contrôle en boucle fermée garantissant la stabilité de l'essai, et répondant aux exigences de l'EN 12390-4 pour une machine de classe 1, dont le fonctionnement peut-être contrôlé, c'est à dire en assurant une vitesse de déplacement (CMOD ou flèche) constante et une rigidité suffisante pour éviter des zones instables sur la courbe charge – flèche ou charge-CMOD. Durant l'essai le CMOD augmente à une vitesse constante de 0,05 mm/mn. Lorsque le CMOD atteint 0,1mm, la machine doit fonctionner de manière à ce que le CMOD augmente à une vitesse constante de 0,2 mm/mn. Au cours des 02 premières minutes de l'essai, les valeurs de la charge et du CMOD correspondant doivent être enregistrées à une fréquence d'au moins 5Hz, cette fréquence pouvant être réduite ultérieurement à 1 Hz minimum. L'essai doit être terminé à une valeur de CMOD d'au moins 4 mm.



FigIV-7: Eléments du dispositif de flexion 03 points

IV-5 : Expression des résultats

IV-5-1 : Equivalence entre CMOD et flèche

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

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04$$

Où :

δ est la flèche en mm ;

CMOD est la valeur du CMOD, en millimètres, mesurée dans le cas d'une distance entre le bas de l'éprouvette et la ligne de mesurage $y=0$.

Dans le cas où la ligne de mesurage se situe à une distance y en dessous du bas de l'éprouvette, la valeur du CMOD doit être déduite de la valeur mesurée $CMOD_y$ à l'aide de l'expression :

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h + y}$$

Avec h : hauteur totale de l'éprouvette.

Afin de transformer les diagrammes charge-CMOD en diagrammes charge-flèche, il convient de transformer l'axe du CMOD à l'aide des valeurs de CMOD et de δ figurant dans le tableau IV-4.

CMOD (mm)	δ (mm)
0,05	0,08
0,1	0,13
0,2	0,21
0,5	0,47
1,5	1,32
2,5	2,17
3,5	3,02
4,0	3,44

Tableau IV-4 : Relation entre CMOD et δ

IV-5-2 : Limite de proportionnalité :

La limite de proportionnalité désignée par le *LOP* est donnée par l'expression :

$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_l l}{2bh_{sp}^2}$$

où :

$f_{ct,L}^f$ est la *LOP*, en newtons par millimètre carré.

F_L est la charge correspondant à la LOP, en newtons ou charge max.

l est la portée en millimètres ;

b est la largeur de l'éprouvette, en millimètres ;

h_{sp} est la distance entre le fond de l'entaille et le haut de l'éprouvette, en millimètres.

En d'autre termes le LOP est appelé aussi module de rupture qui est égale à la contrainte imposée à la fibre inférieure de la poutre lorsque la charge appliquée est maximale (en supposant une répartition linéaire des contraintes sur toute la hauteur de la poutre). L'énergie de rupture correspond à l'aire sous la courbe CMOD ou flèche en fonction de la charge (cela correspond à la zone hachurée de la figure IV-9).

IV-5-3 : Résistance résiduelle à la traction par flexion

La résistance résiduelle à la traction par flexion f_{Rj} est donnée par l'expression :

$$f_{Rj} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

Où :

f_{Rj} est la résistance résiduelle à la traction par flexion, correspondant à $CMOD = CMOD_j$ ou $\delta = \delta_j$ ($j=1,2,3,4$), en newtons par millimètre carré.

F_j est la charge correspondant à $CMOD = CMOD_j$ ou $\delta=\delta_j$ ($j= 1, 2, 3, 4$) en newtons.

l est la portée en millimètres.

h_{sp} est la distance entre le fond de l'entaille et le haut de l'éprouvette, en millimètres.

Et cette résistance résiduelle est définie comme étant la contrainte que la poutre peut reprendre juste après la chute brutale de la charge qui est illustrée dans la figure IV-8.

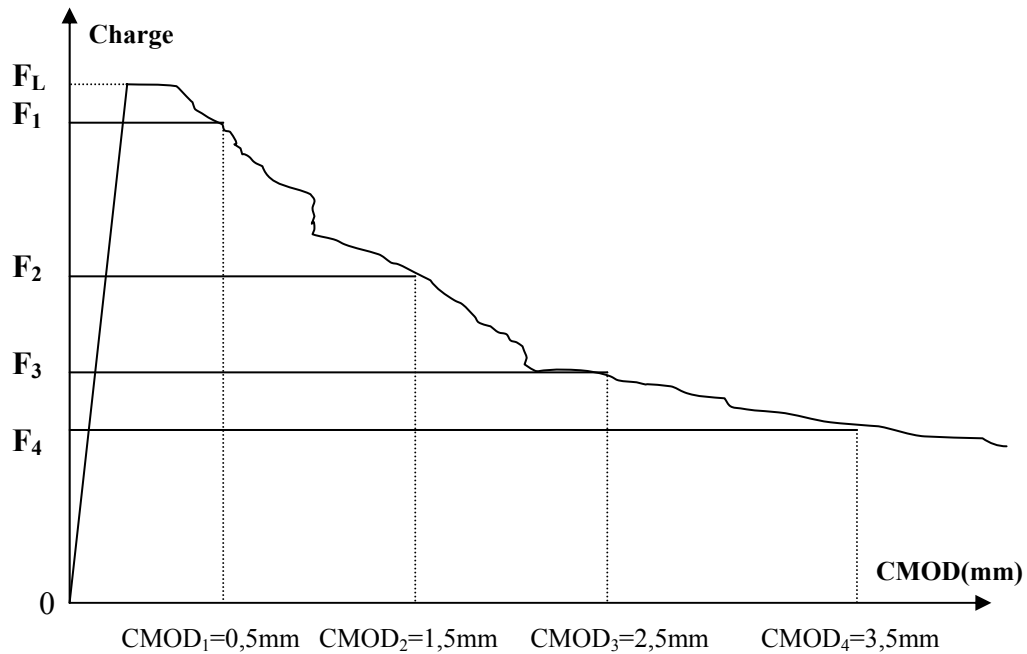


Figure IV-8 : Diagramme charge – CMOD et F_j ($j=1,2,3,4$)

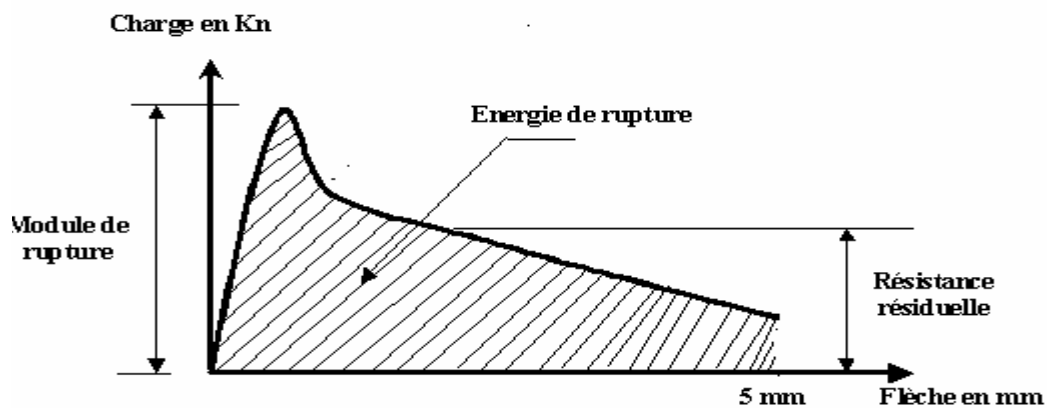


Figure IV-9 : Propriétés du béton armé de fibres telles que déterminées à partir des essais de flexion 03 points

Les courbes « force-flèche » obtenues permettent de caractériser la réponse des bétons autoplaçants fibrés par la charge maximale (F_{\max}) ainsi que par les ouvertures de fissures maximale ($\text{cmod}_{F_{\max}}$) associée à cette charge maximale : cette ouverture correspond à la capacité maximale de déformation avant localisation de la macrofissuration.

IV-5-4 : Résultats et discussions :

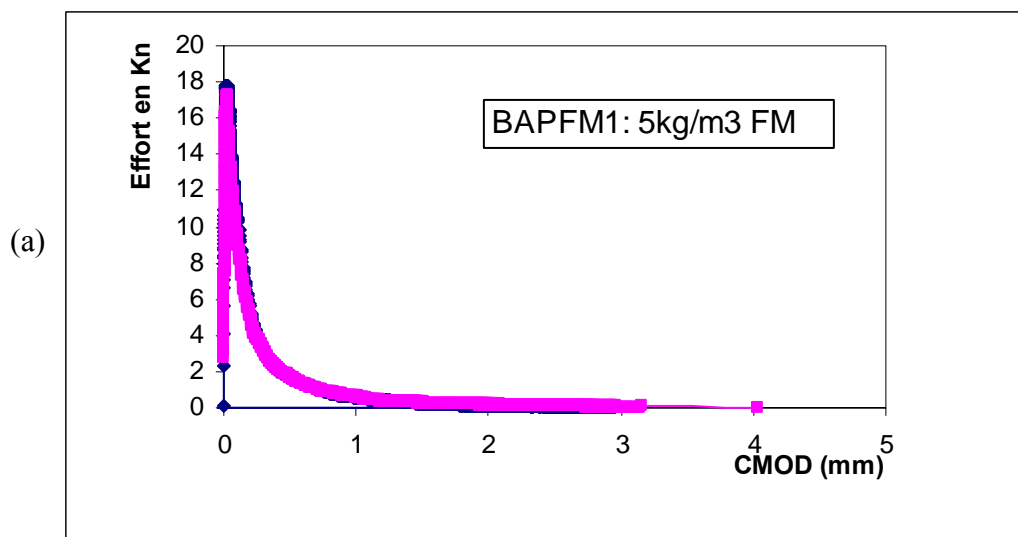
IV-5-4-1 : Résultats pour les bétons autoplaçants monofibré :

Pour chaque composition, trois éprouvettes ont été testées. Les courbes des figures IV-10 permettent d'apprécier l'influence des ajouts des fibres métalliques (fonte amorphe), tandis que celles de la figure IV-12 illustrent les effets des fibres synthétiques (polypropylènes) sur les bétons autoplaçants. Et enfin les courbes des figures IV-14 et IV-16 montrent respectivement l'effet des fibres mixtes pour différents dosages. Les essais ont été menés jusqu'à une flèche de 5mm, mais pour mettre en valeur la zone au voisinage du pic de charge, un diagramme montrant les détails est systématiquement proposé avec une flèche limitée à 1mm.

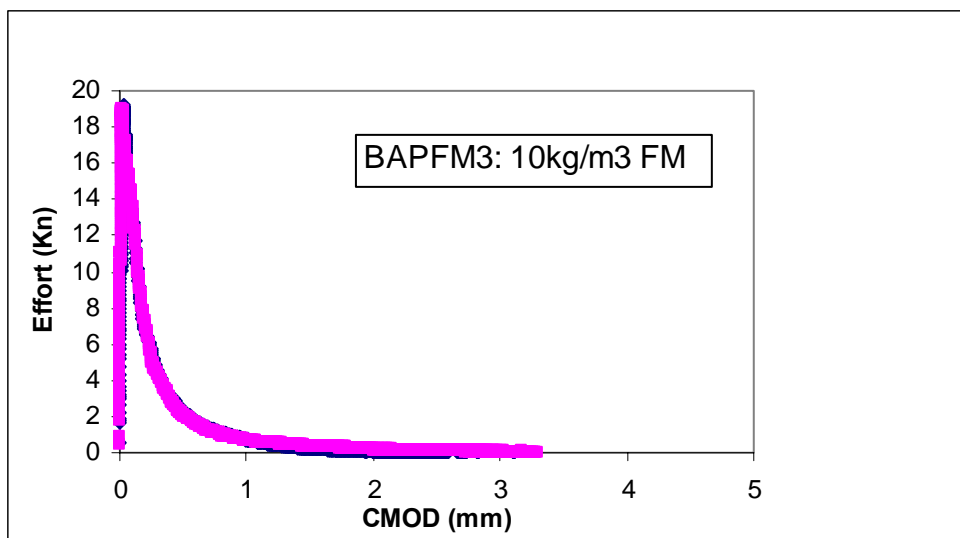
IV-5-4-1-1 : Bétons autoplaçants avec fibres métalliques :

a) courbes « Force--CMOD » :

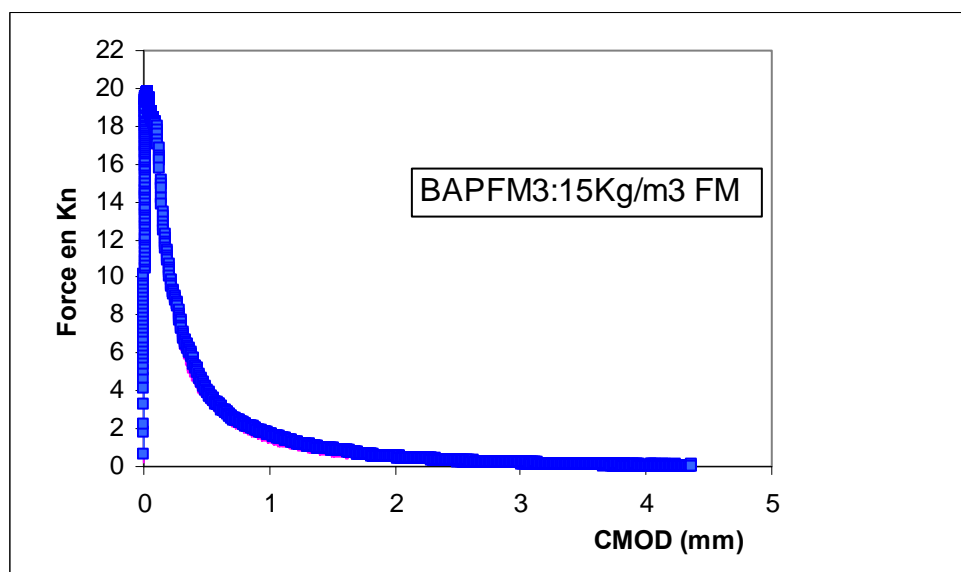
Les courbes « force - cmod » représentées sur la figure IV-10 montrent les réponses mécaniques des éprouvettes testées. Les détails au voisinage du pic de charge sont donnés à la figure IV-10b avec une ouverture de fissure limitée à 1 mm.



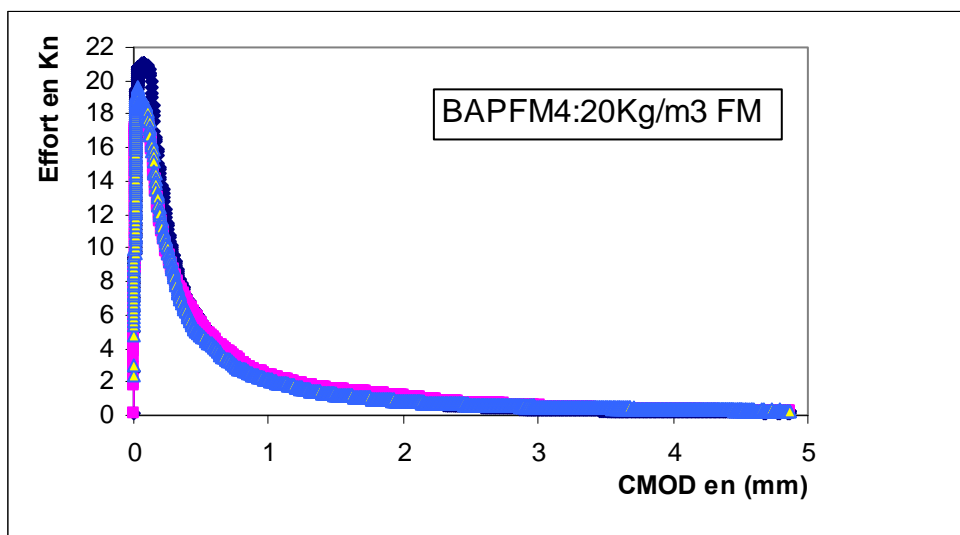
(b)



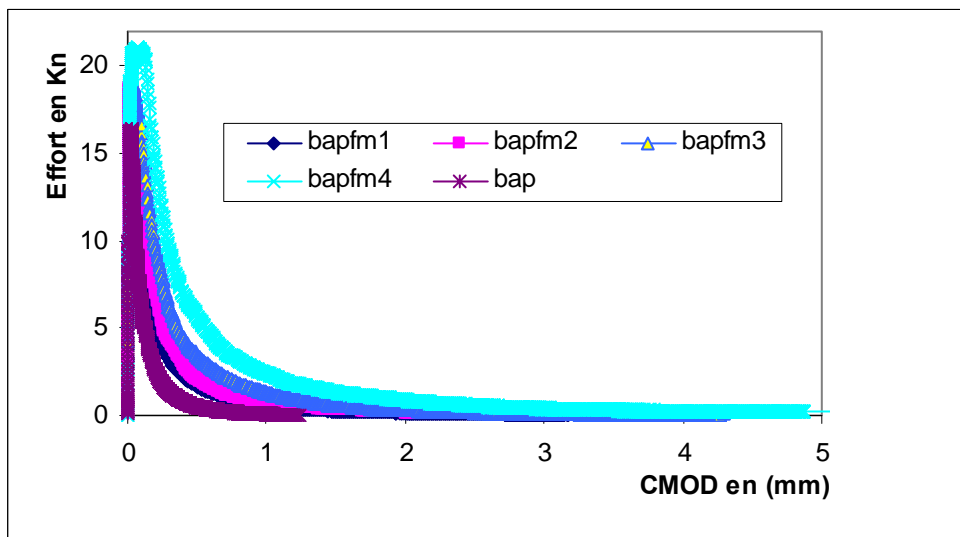
©



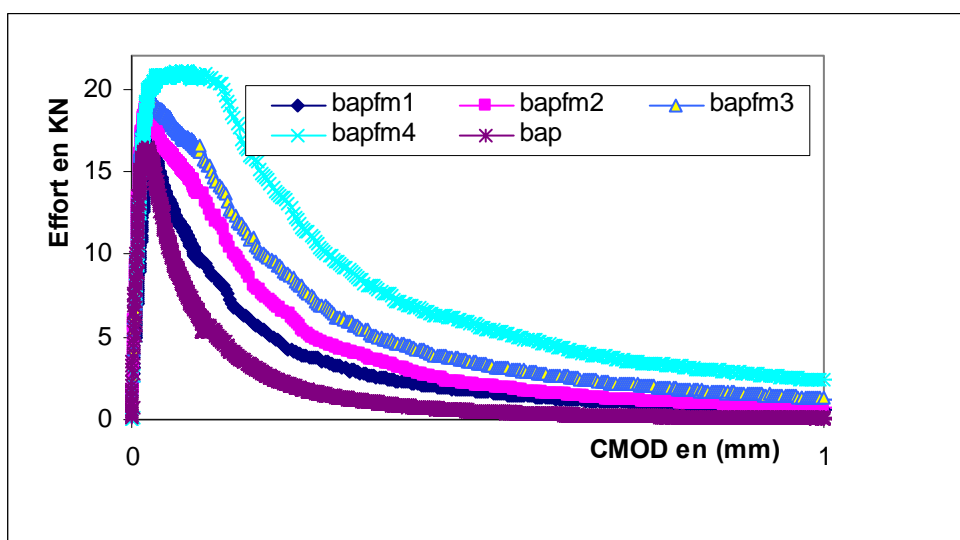
(d)



(e)



(f)



(g)

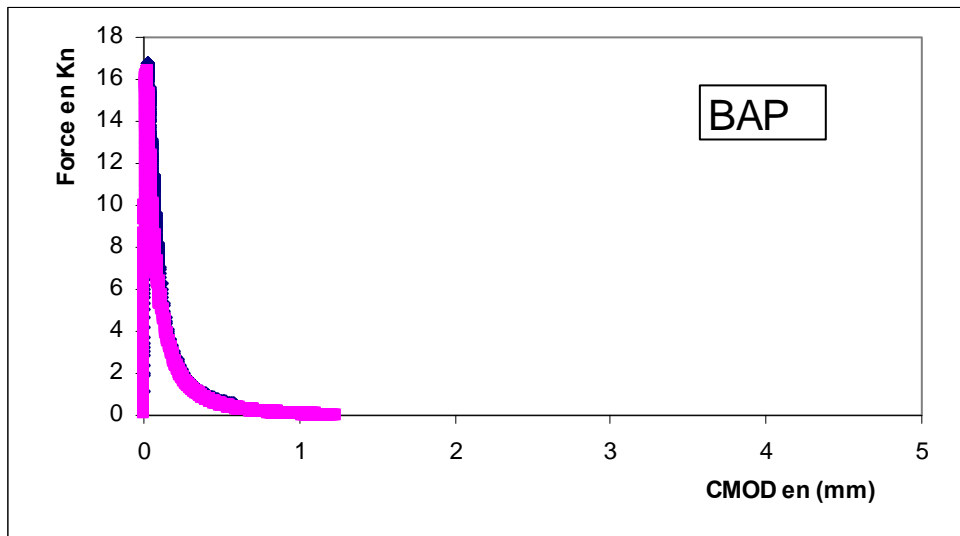


Figure IV-10: Courbes « Force-CMOD » obtenues en flexion trois points sur éprouvettes entaillées : influence des fibres métalliques

Quatre dosages ont été expérimentés : 5Kg/m^3 , 10Kg/m^3 , 15Kg/m^3 et enfin 20Kg/m^3 . Pour les quatre formulations, les mêmes constituants ont été utilisés pour la matrice.

L'avantage majeur que procurent les fibres métalliques de type fonte amorphe, réside sans aucun doute dans le fait qu'elles permettent d'accroître de façon significative la résistance à la traction par flexion, appelé aussi le LOP (limite de proportionnalité) selon les normes européenne. Dans la figure IV-10(a) sont représentées les courbes moyennes effort-ouverture de fissure obtenues pour les quatre BAPFM. Au regard de cette figure, on constate que :

- Le comportement mécanique est très nettement amélioré quand on passe de 5 à 20Kg/m^3 .
- Le comportement mécanique est pratiquement identique quand on passe de 5 à 15Kg/m^3 .
- La capacité portante résiduelle est nettement plus élevée pour un dosage de 20Kg/m^3 .

Le couple « charge maximale- capacité maximale de déformation avant localisation de la fissuration » est donné dans le tableau IV-5 ci-dessous pour chaque composition.

	BAP	BAPFM1	BAPFM2	BAPFM3	BAPFM4
$F_{\max}(\text{Kn})$	16,6	17,1	19,09	19,09	19,67
$\delta_{F\max}(\text{mm})$	0,03	0,039	0,045	0,064	0,085

Tableau IV-5 : Charge maximale et capacité maximale de déformation avant localisation de la fissure

On peut voir qu'à une ouverture de fissure de 0,031 mm, on se trouve dans la phase post-pic pour le béton autoplaçant de référence, alors que pour les autres compositions, on est encore sur le palier de pre-pic (charge maximale).

On peut aussi observer d'après les courbes de la figure IV-10, que par rapport au béton autoplaçant témoin, l'ajout de fibres métalliques se traduit par un gain de résistance, d'autant plus fort que ces fibres sont en plus grande quantité. De plus, le nouveau pic de résistance ainsi obtenu est plus arrondi et maintient une résistance élevée jusqu'à des valeurs de flèches plus importantes, jusqu'à 0,3 mm dans le cas du renfort par 20 Kg/m³ de fibres métalliques. Ensuite ces fibres métalliques adhérentes cassent progressivement, provoquant une perte de résistance.

b) Observation de la fissuration :

Comme nous avons eu l'occasion de le signaler, l'objectif n'est pas la caractérisation microstructurale de la fissuration des bétons autoplaçants fibré, mais une recherche des premiers éléments pour corréler la réponse de ces composites cimentaires en traction par flexion.

Quelle que soit la composition considérée, une campagne d'essai statique a été réalisée et l'un des objectifs était d'étudier le comportement des mélanges sous chargements monotone croissant afin :

- D'observer la variabilité de comportement des différents corps d'épreuve au travers des réponses effort- ouverture de fissure au centre.
- De définir un seuil de linéarité, seuil réputé correspondre à la fissuration de la matrice à partir duquel les fibres se trouvent partiellement mobilisées.
- De définir une charge moyenne de ruine statique.
- De définir les différents niveaux de chargements qui mettent en évidence le rôle des fibres.

L'ensemble des comportements des essais est illustré dans les courbes de la figure IV-10. On observe des réponses globalement similaires, sauf évidemment pour BAPFM4 (15 Kg de fibres par m³) qui a enregistré une réponse plus significatif. Deux niveaux de chargements, correspondant à des changements de comportement des éprouvettes sont à étudier : la charge limite de la réponse élastique linéaire, et la charge maximale supportée.

▪ ***Concernant la charge limite d'élasticité linéaire et la flèche correspondante :***

La valeur moyenne de la charge correspondant à la première fissuration de la matrice cimentuse non fibrée a été estimée à 16,6 Kn, pour une ouverture du cmod moyenne de 0,025 mm, alors que pour les bétons autoplaçants fibrés, cette même charge a variée entre 17,1 Kn et 19,67 Kn. Et ceci pour des valeurs de cmod moyennes allant jusqu'à 0,09 mm. Le calcul des contraintes maximales correspondantes, en supposant que le matériau a un comportement élastique linéaire et en appliquant la théorie des poutres, donne une valeur de 5,13 Mpa pour le BAP non fibré et des valeurs oscillants entre 5,47 et 6,30 Mpa pour les bétons autoplaçants fibrés.

▪ ***Concernant la charge maximale et le cmod correspondant :***

Alors que le béton autoplaçant sans fibres atteint la rupture peu après l'atteinte de la charge de fissuration, tout les mélanges renforcés ont présenté une pseudo-ductilité significative. Pour tous les bétons autoplaçants fibrés, l'apparition de la première fissure n'est généralement pas suivie par une chute immédiate de capacité portante. On assiste plutôt à un comportement qu'on pourrait qualifier de pseudo-écrouissage. Selon Saucier et al [62], un tel comportement est nécessaire à l'obtention de la multifissuration. Toutefois parmi l'ensemble des éprouvettes testées, seules quelques unes présentaient plus d'une fissure, soit deux fissures localisées sous les points d'applications de la charge. On ne peut donc conclure à un comportement véritablement multi-fissurant.

En conséquence les courbes enregistrées par le capteur inductif fournissent réellement l'ouverture d'entaille (CMOD) de la poutre en fonction de l'effort appliqué par le vérin. Elles mettent en évidence plusieurs phases de comportements des bétons autoplaçants fibrés soumis à la flexion comme mentionnées ci dessous.

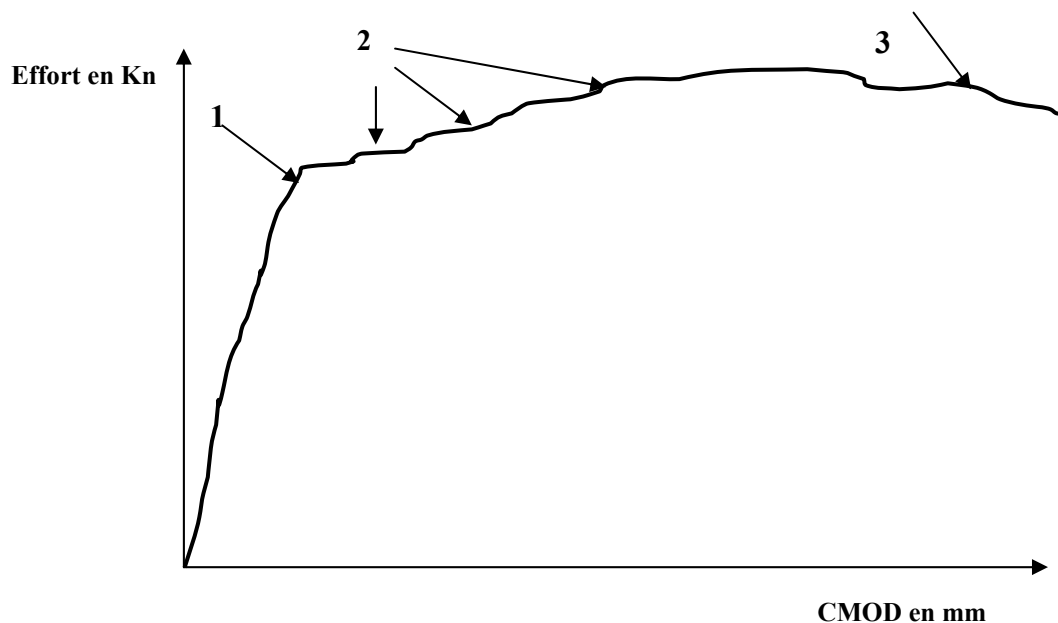


Figure IV-11 : Essai monotone croissant

- Phase de réponse élastique linéaire ou le matériau non fissuré fonctionne comme un composite. La matrice et les fibres subissent localement les mêmes déformations.
- Amorçage des fissures (1), l'éprouvette se fissure dans une zone ce qui provoque une diminution de l'effort, localement les fibres reprennent la sollicitation de traction alors que la matrice est fissurée.
- D'autres fissures se développent progressivement au fur et à mesure que le chargement augmente (2), jusqu'à ce stade, aucune fissure n'est visible à l'œil nu, le matériau est endommagé en traction dans la zone tendue.
- Localisation des déformations dans la zone la plus faible, à ce moment la fissuration devient perceptible et la charge décroît (3).

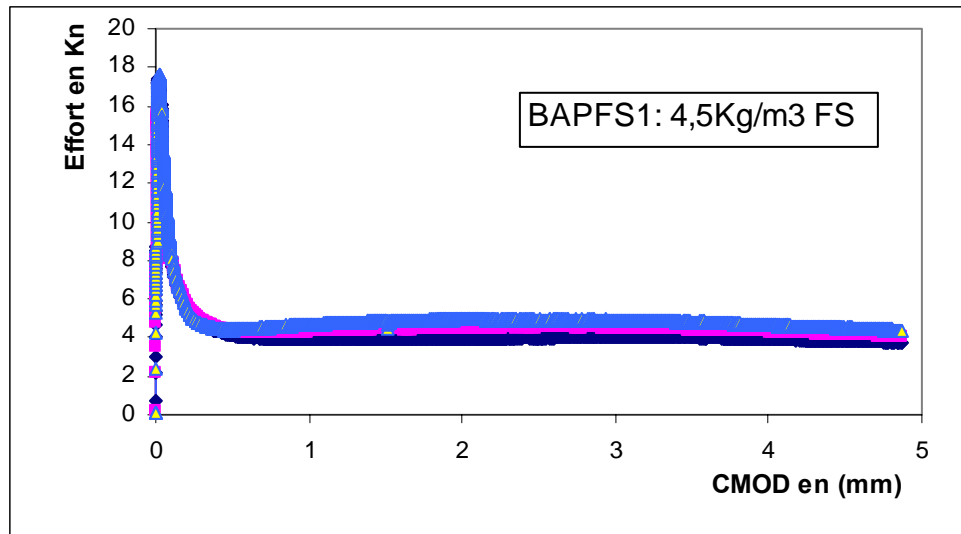
IV-5-4-1-2 : Bétons autoplaçants avec fibres synthétiques.

a) Courbes « Force-CMOD »

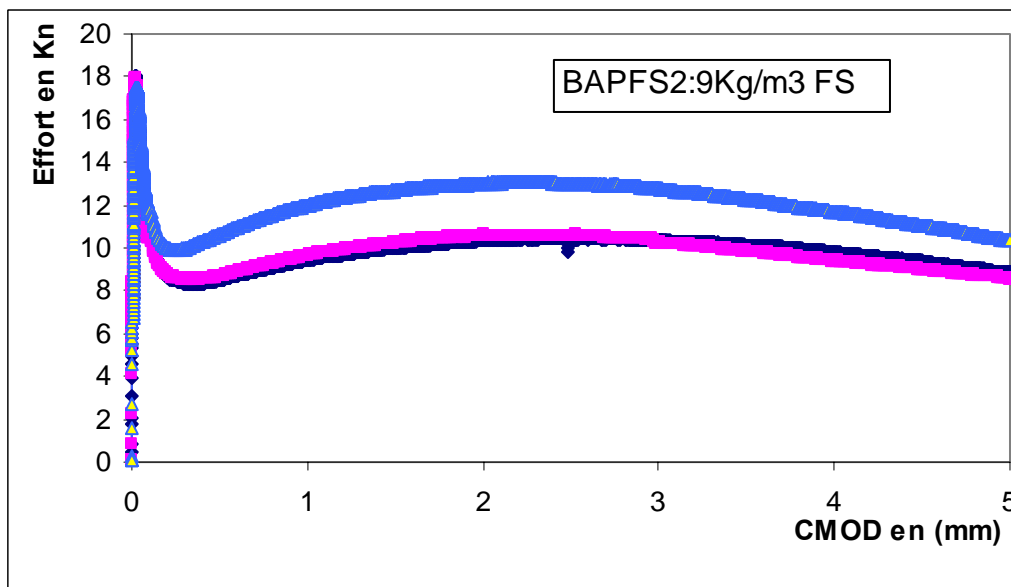
Pour les fibres synthétiques, aux dosages considérés, on observe, en comparaison avec le mélange témoin, figure IV-12, qu'elles ne sont d'aucun apport sur le pic de résistance qui reste presque inchangé. Par contre, dans le domaine post-pic, au dosage de 9Kg/m³, la perte de résistance observée est quasiment nulle.

Ces résultats soulèvent des questions importantes sur les avantages réels que procurent les fibres en polypropylènes dans la construction, mais surtout, sur la façon dont on peut évaluer ces avantages.

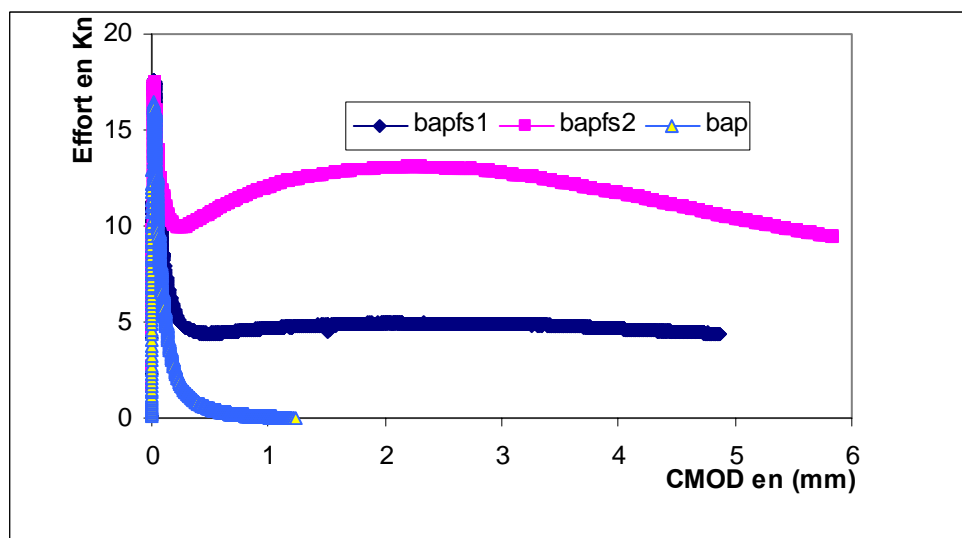
(a)



(b)



(c)



(d)

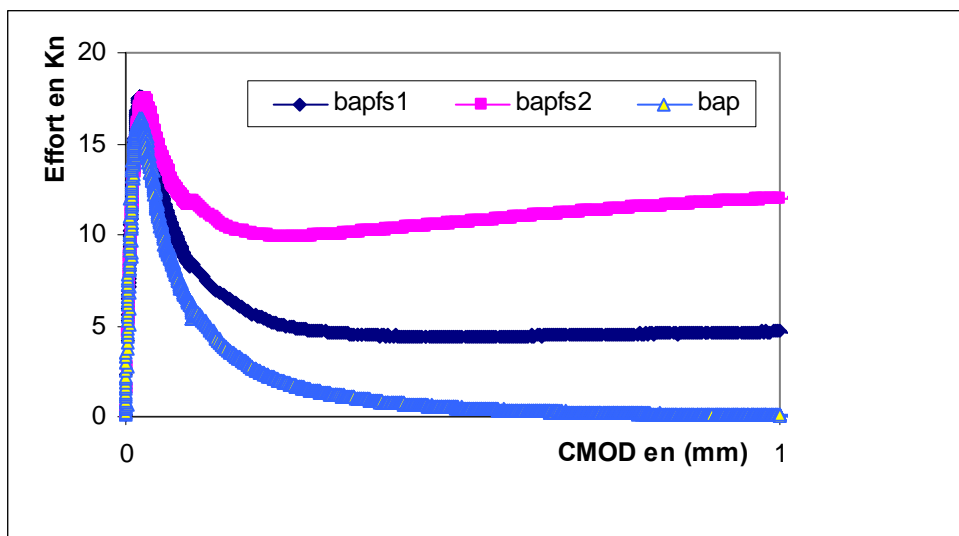


Figure IV-12 : Courbes « Force-cmod » obtenues en flexion trois points sur éprouvettes entaillées : Influence des fibres synthétiques

Deux dosages ont été expérimentés : $4,5 \text{ Kg/m}^3$ et 9 Kg/m^3 . Pour les deux formulations, les mêmes constituants ont été utilisés pour la matrice.

Les résultats présentés dans le tableau IV-6 et illustrés par les courbes des figures IV-12 permettent d'évaluer l'influence du dosage en fibres synthétiques sur la capacité portante résiduelle post-pic.

	BAP	BAPFS1	BAPFS2
$F_{\max} \text{ (Kn)}$	16,6	16,92	17,84
$\delta_{F_{\max}} \text{ (mm)}$	0,03	0,065	0,09

Tableau IV-6 : Charge maximale et capacité maximale de déformation avant localisation de la fissure

On peut se rendre compte, que les fibres synthétiques ont la capacité à transférer des contraintes à travers la fissure, conférant ainsi au composite une capacité portante résiduelle

d'autant plus importante que le dosage en fibres est élevé, tout en constatant une similitude de comportement pour les deux dosages.

Il est tout à fait clair qu'à une ouverture de fissure de 0,031 mm, on se trouve dans la phase post-pic pour le béton autoplaçant de référence, alors que pour les autres compositions, on est encore sur le pallier de pré-pic.

Ainsi, globalement, on peut déduire de ces résultats que l'effet du renfort par des fibres synthétiques sur la capacité portante résiduelle post-pic reste prépondérant vis à vis du dosage. Par ailleurs, toutes proportions gardées, l'incorporation des fibres synthétiques ne nuit pas à la capacité portante maximale du composite cimentaire et les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- Le comportement mécanique (capacité portante) est peu modifié.
- Le comportement post-pic est nettement amélioré, notamment au niveau des contraintes résiduelles dont le rôle de ces fibres demeure prépondérant, grâce à la capacité des matériaux à se déformer pour des efforts élevés sans diminution significative de la résistance.
- Bonne ductilité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'énergie nécessaire à l'absorption à la rupture.

Les fibres synthétiques qui possèdent d'excellentes caractéristiques de dispersion, les rendant idéales pour les mélanges et leurs mises en œuvres. Elles aident les composites cimentaires à maintenir un écoulement uniforme et produisent un mélange plus cohésif ce qui justifie leurs utilisation dans les bétons autoplaçants.

La dispersion régulière des fibres synthétiques dans les bétons autoplaçants, réalise un réseau fibré multidirectionnel de haute densité.

Les fibres guident et absorbent la fissuration qui se développent pendant les premières heures de leur mise en œuvre (phase dite plastique), cela permet à ces bétons autoplaçants de développer des résistances suffisantes pour prévenir la fissuration.

La micro-fissuration développée pendant la phase plastique de ces bétons autoplaçants, peut, si elle n'est pas contrariée évoluer en micro-fissuration. Ces fibres possèdent pas mal de qualité qui font d'elles d'excellentes renforts : on peut citer :

- Amélioration des résistances aux chocs et à l'abrasion : La ténacité est la principale caractéristique par laquelle les bétons autoplaçants avec fibres synthétiques se démarquent. Pour le béton sans fibres, la contrainte est nulle après la rupture. Par ailleurs, pour les bétons autoplaçants fibrés, la contrainte diminue une fois la rupture du béton

effectuée, mais une partie de l'effort est reprise au fur et à mesure que le déplacement augmente jusqu'à rupture des fibres.

- Réduction de perméabilité.
- Amélioration de la durée de vie des bétons autoplaçants et mortier.
- Ces fibres peuvent se substituer au treillis anti-fissuration, mais elles n'ont aucune capacité de renforcement structural des bétons.

b) Observation de la fissuration :

Les résultats des essais de flexion trois points réalisés sur les bétons autoplaçants renforcés de fibres synthétiques sont illustrés sur les courbes de la figure IV-12. On constate rapidement d'après les courbes, que le renforcement avec les fibres synthétiques, même à des forts dosages, n'influence pas de façon très significative la limite de proportionnalité (LOP), ou en d'autres termes la résistance à la traction par flexion.

Conformément à ce qu'on observe généralement, c'est le comportement post-fissuration qui se voit très modifié. On remarque dans le tableau IV-6 que la charge de rupture en flexion est sensiblement modifiée avec l'addition des fibres synthétiques et que pour une même matrice, les fissures sont reprises jusqu'à une grande échelle. Les résultats obtenus tendent par ailleurs à indiquer que, comparativement aux fibres métalliques (fonte amorphe), les fibres synthétiques permettent une reprise des efforts plus importante après l'initiation de la fissuration. La géométrie de ces dernières favorise un meilleur ancrage et incidence. Tous les mélanges avec fibres synthétiques ont présenté une réponse post-pic plus ductile avec l'augmentation du mélange en fibres. D'un autre côté les fibres ont accru une ductilité significative et particulièrement pour BAPFS2 (9Kg/m³). Et évidemment le résultat obtenu a été conforme aux attentes.

IV-5-4-2 : Bétons autoplaçants à fibrage hybride (mixte) :

IV-5-4-2-1 : Différents facteurs intervenants dans le comportement mécanique des BAP fibrés :

IV-5-4-2-1-1 : Influence du pourcentage des fibres, effets de groupe positif et négatif, seuils d'efficacité et de saturation, et domaine d'efficacité :

On pourrait, naïvement, penser que plus on augmente le pourcentage des fibres dans un BAP, plus on augmente leur efficacité vis-à-vis du comportement à l'échelle du matériau ou à celle de la structure, que ce soit des fibres métalliques (fonte amorphe) ou synthétiques (polypropylènes). En fait, il n'en est rien, car deux types d'effets interviennent dans l'influence du pourcentage du fibrage mixte vis-à-vis du comportement mécanique (capacité

portante maximale) et comportement post-pic (ductilité et capacité de déformation). Il s'agit des effets de groupe positif et négatif. Ces deux effets ont la même origine, qui se situe au niveau des interactions entre fibres au sein de la matrice autoplaçante fissurée. L'apparition de ces effets de groupe est liée à des effets de seuil dans le pourcentage de fibres.

■ **Effet de groupe positif :**

Cet effet peut se décrire et s'analyser de la manière suivante [63]: imaginons 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 (mélange hybride) 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 du « mixage » devient alors la somme de leurs actions individuelles plus quelque chose qui est la conséquence de leur « entraide », qu'on peut également qualifier d'interaction positive (ce qui fait nettement plus scientifique).

Le passage du fonctionnement individuel des fibres à un fonctionnement d'entraide peut se caractériser par un seuil sur le pourcentage de fibres, puisque l'espacement moyen entre fibres au sein de la matrice dépend directement du pourcentage incorporé. On se propose d'appeler ce seuil, *seuil d'efficacité (P_e)*.

■ **Effet de groupe négatif :**

Cet effet est une suite logique de l'effet de groupe positif. En effet, lorsqu'on rapproche de plus en plus les deux fibres différentes, 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. Donc chaque fibre travaillera moins bien que si elles avaient travaillé sans interaction. Le bilan du « mixage » est alors la somme de leurs actions individuelles moins quelque chose qui est la conséquence de leur « promiscuité », qu'on peut également qualifier d'interaction négative.

Le passage de l'effet de groupe positif à l'effet de groupe négatif peut également se caractériser par un seuil sur le pourcentage de fibres que l'on se propose d'appeler *seuil de saturation (P_s)*. En effet, à partir de ce seuil, plus on ajoute des fibres, moins elles travaillent individuellement bien, et on assistera, au mieux, à une très faible augmentation des caractéristiques mécaniques et, au pire, à une diminution de ces caractéristiques.

La figure IV-13 présente une courbe schématique représentant l'évolution d'une caractéristique mécanique quelconque d'un béton autoplaçant fibré en fonction du pourcentage de fibres. Il est évident que le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer, par exemple une fibre métallique pour augmenter les capacités portantes, ou une fibre synthétique pour améliorer le comportement post-fissuration ou la ductilité des bétons autoplaçants.

Que ce soit le seuil d'efficacité (P_e), ou le seuil de saturation (P_s), ils dépendent tous deux du type de fibre, de ses dimensions, du fait que la fibre fonctionne par ancrage réparti le long de la fibre ou concentré à ses extrémités ou, encore, par adhérence, du type de matrice (plus ou moins compacte), de l'orientation des fibres vis-à-vis des fissures, donc du type d'application industrielle.

Le pourcentage de fibres optimal du point de vue technico-économique se trouve dans l'intervalle $[P_e, P_s]$. On se propose d'appeler cet intervalle, **domaine d'efficacité** d'un béton autoplaçant à fibrage mixte relatif à une application industrielle (Fig IV-13).

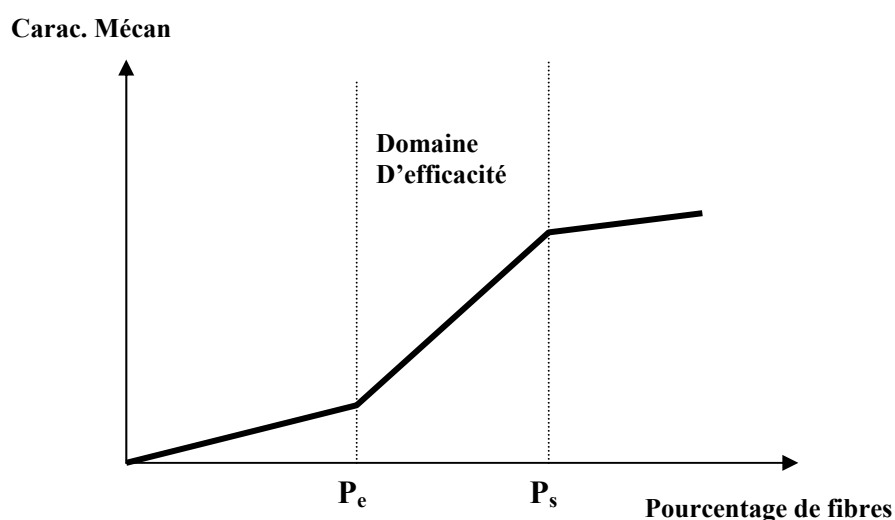


Figure IV-13: Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécanique en fonction du pourcentage en fibres

IV-5-4-2-1-2 : Influence du pourcentage de fibres sur la résistance des bétons autoplaçants à fibrage mixte :

Il a été indiqué dans les paragraphes précédents que, pour améliorer le comportement mécanique d'un béton autoplaçant ayant une maniabilité correcte, il faut utiliser un

pourcentage élevé de fibres courtes [26]. Il y a deux questions que l'on peut se poser en corollaire de cette recommandation :

- Qu'en est-il de ces résistances lorsque l'on utilise des fibres longues ?
- Ces résistances sont-elles augmentées proportionnellement lorsqu'on utilise simultanément des fibres de longueurs et natures différentes ?

Pour répondre à ces deux questions, il faut se reporter au chapitre « Formulation », qui met en évidence la relation étroite entre les différents constituants du béton autoplaçant, et les paramètres qui influent directement sur la résistance. Deux situations peuvent se rencontrer :

- **Situation1 : BAP constitué de fibres longues et fibres courtes de même nature :**

Or, il a été indiqué, précédemment, que les fibres longues en faible pourcentage (pour des raisons de maniabilité déjà évoquées) n'interviennent pas sur les résistances. En conséquence, l'introduction des fibres longues conduit à une matrice moins résistante, qu'elles ne renforcent pas. Et les fibres courtes interviennent dans des zones différentes : y'a t-il un cumul des avantages des deux fibres ? Y'a t-il une synergie positive ?

- **Situation2 : BAP constitué de fibres longues et fibres courtes de nature différentes :**

Dans ce cas quatre effets peuvent co-exister :

- Une diminution des résistances de la matrice avec l'augmentation du nombre de fibres qui se traduit par une augmentation du nombre de microfissures.
- Une augmentation de l'efficacité des fibres vis-à-vis des microfissures, dans le cas où le pourcentage des fibres se trouve dans le domaine d'efficacité.
- Une stagnation de l'efficacité des fibres vis-à-vis des microfissures dans le cas où le pourcentage des fibres se trouve au delà du seuil de saturation.
- Superposition des effets positifs, et intervention simultanément au niveau du matériau et de la structure.

Le bilan de la coexistence de ces quatre effets peut se résumer ainsi : bien que l'augmentation des résistances en traction et en compression avec le pourcentage de fibres métalliques courtes soit le résultat le plus fréquemment attendu, et obtenu, on peut aboutir à une stagnation, voire une diminution de ces résistances pour certains pourcentages, notamment dans le cas de la compression, pour laquelle les fibres courtes sont moins efficaces. La transition entre le rôle

positif des fibres métalliques courtes et synthétiques élancées vis-à-vis des résistances des bétons autoplaçants et un rôle négligeable ou négatif va dépendre du type de fibre, de ses dimensions (fibre plus ou moins courte), et de la compacité de la matrice.

IV-5-4-2-1-3 : Relation entre type, dimensions et caractéristiques mécaniques d'une fibre, et compacité de la matrice :

Il existe, à l'heure actuelle, deux grandes familles de fibres qui se distinguent principalement par leur fonctionnement mécanique :

- Les fibres métalliques : qui peuvent être adhérentes (fonte amorphe) et dans l'intérêt principal, c'est de limiter fortement les ouvertures de fissures en raison de leur bonne adhérence dans la matrice cimenteuse.
- Les fibres synthétiques (polypropylène) : qui sont des fibres synthétiques faites à 100% de polypropylène vierge, à filament individuel, conçues et fabriquées exclusivement pour les bétons et mortiers, vu son excellente résistance aux agents agressifs.

Comme cela a été dit précédemment, les fibres métalliques ont pour rôle de reprendre des efforts au travers des micro ou des macrofissures qui se forment. On peut affiner cette description de la manière suivante : au moment de la création d'une fissure, une partie de l'énergie élastique emmagasinée dans le volume de béton considéré (sans aucune armature) est restituée et consommée principalement sous forme d'énergie de création de surface (les lèvres de la fissure constituent deux surfaces créées) et d'énergie cinétique (liée à la vitesse de propagation des fissures). Plus la différence entre l'énergie élastique et l'énergie de création de surface est importante, plus la propagation de la fissure est instable, l'énergie cinétique importante, et le comportement du volume de béton fragile.

A partir de cette analyse, les fibres peuvent intervenir dans le bilan énergétique de la manière suivante :

- Dans le cas où l'on veut que les fibres interviennent à l'échelle des microfissures, c'est à dire avant localisation de la ou des macro- fissures, les fibres participent à deux niveaux dans le bilan énergétique : au niveau de l'énergie élastique emmagasinée, par l'intermédiaire de la déformation élastique de la fibre, et au niveau de l'énergie dissipée, par l'intermédiaire des glissements avec frottements de la fibre dans la matrice, de sa plastification et de sa rupture éventuelles. Cette double intervention dans le bilan énergétique concourt à l'augmentation des résistances du volume de béton, mais, puisque les fibres modifient les deux termes du bilan, ou bien c'est le

terme énergie élastique emmagasinée qui l'emporte sur le terme énergie dissipée, ce qui se traduit par une augmentation de la fragilité du matériau, ou bien c'est le contraire, ce qui se traduit par une augmentation de la fragilité du matériau, ou bien c'est le contraire, ce qui se traduit alors par une augmentation de la ductilité du matériau.

- Dans le cas où l'on veut que les fibres interviennent à l'échelle de la structure, c'est à dire après localisation des macro-fissures, on tient le même raisonnement que ci-dessus, en remplaçant le mot matériau par le mot structure.

La dissipation d'énergie par la fibre est d'autant plus grande que les frottements sont importants, et la plastification de la fibre se fait sur une grande longueur avant une éventuelle rupture de celle-ci. Par ailleurs, pour une même fibre, incorporée en pourcentage identique, les frottements sont d'autant plus importants que la matrice est compacte. Donc, à même section totale de fibres interceptée par une fissure, si l'on désire dissiper la même énergie par frottements, il est préférable d'utiliser une fibre plus longue de type synthétiques GRACE lorsque la compacité de la matrice diminue et, inversement, si l'on veut éviter une rupture précoce de fibres. En outre, la différence entre l'énergie élastique emmagasinée et l'énergie de création de surface augmente avec l'augmentation de la compacité du béton.

A compacité identique et pour des ouvertures de fissures qui restent faibles à l'échelle de la structure, la fibre courte est plus efficace que la fibre longue.

Dans le bilan d'énergie relatif à la fissuration des bétons autoplaçants fibrés, il apparaît que seules l'énergie élastique emmagasinée et les énergies dissipées par plastification et rupture de la fibre sont directement liées à ses caractéristiques mécaniques, l'énergie dissipée par frottement ne l'étant qu'indirectement. Le fait d'augmenter, par exemple, la limite d'élasticité et le module d'Young de la fibre a un certain nombre de répercussions sur le bilan énergétique.

En augmentant les caractéristiques élastiques de la fibre, on diminue sa ductilité [64], c'est à dire que l'on diminue sa déformation plastique avant rupture. Donc, si la fibre, du fait de sa longueur et de la compacité de la matrice, est amenée à se rompre dans celle-ci, l'énergie élastique emmagasinée, ainsi que la dissipation d'énergie par frottement augmentent (le frottement se faisant sur une plus grande longueur avant plastification), alors que la dissipation d'énergie par plastification diminue quand on augmente les caractéristiques élastiques de la fibre. En conséquence, si, pour une ouverture de fissure donnée, correspondant par exemple à celle des microfissures avant localisation des macrofissures, ou à

celle des macrofissures avant rupture de la structure, l'augmentation de la somme des trois énergies coïncide avec celle des caractéristiques élastiques des fibres utilisées, alors on observera une augmentation, soit de la résistance du béton autoplaçant fibré à l'échelle du matériau, soit la capacité portante de la structure et, inversement, si la somme des trois énergies diminue. De même si, toujours pour une ouverture donnée, l'augmentation de la différence entre l'énergie dissipée totale par frottement et par plastification, et l'énergie élastique emmagasinée coïncide avec l'augmentation des caractéristiques élastiques de l'une des fibres, alors on observe une augmentation de la ductilité, soit à l'échelle du matériau, soit à l'échelle de la structure et inversement.

Il est aisé de réaliser une analyse de même type dans le cas de la diminution des caractéristiques élastiques de la fibre et de l'augmentation de sa déformabilité plastique.

La conclusion de tout ce qui précède est donc qu'il est important d'optimiser le choix des fibres (types, dimensions, caractéristiques mécaniques) en fonction de la compacité de la matrice.

Cette optimisation se traduit nécessairement par la réalisation de nombreux essais mécaniques en laboratoire, même si l'analyse développée ci-dessus permet de guider et de « dégrossir » le problème. Il est donc impératif que les essais en question soient les plus simples et les moins « lourds » possibles, tout en fournissant l'information souhaitée. Cette information est une information qualitative puisqu'elle est la réponse à la question : « quelle est, pour une matrice et une ouverture de fissure données, la meilleure fibre ? »

Pour ce qui concerne les ouvertures de fissure relatives à des comportements structuraux, l'essai le plus adapté, et qui a fait ses preuves, est l'essai d'arrachement d'une fibre dans une matrice cimentaire [65].

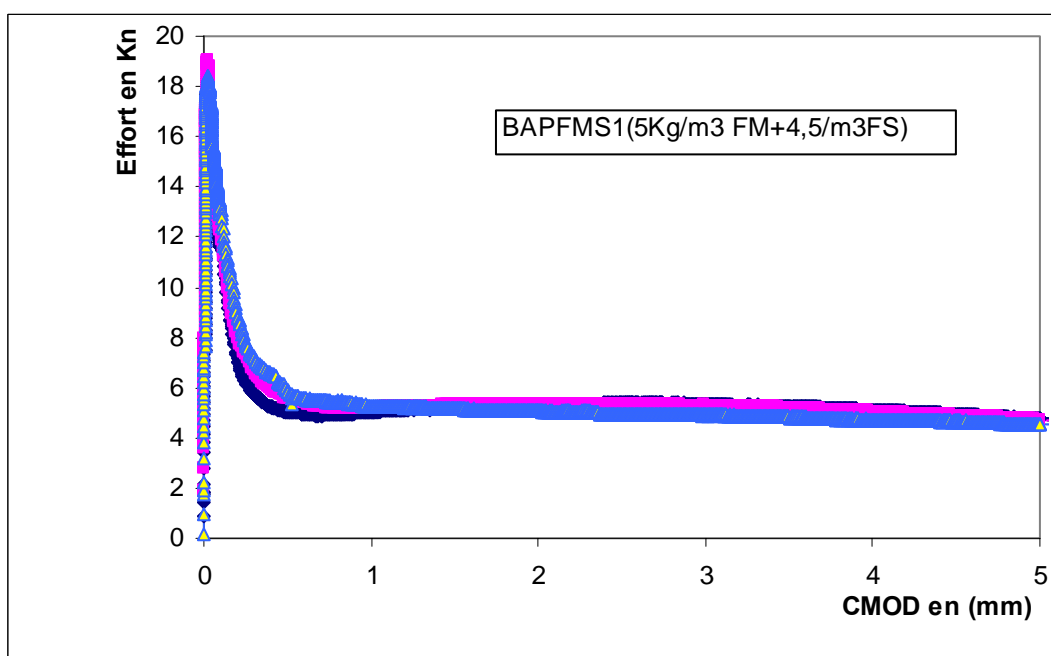
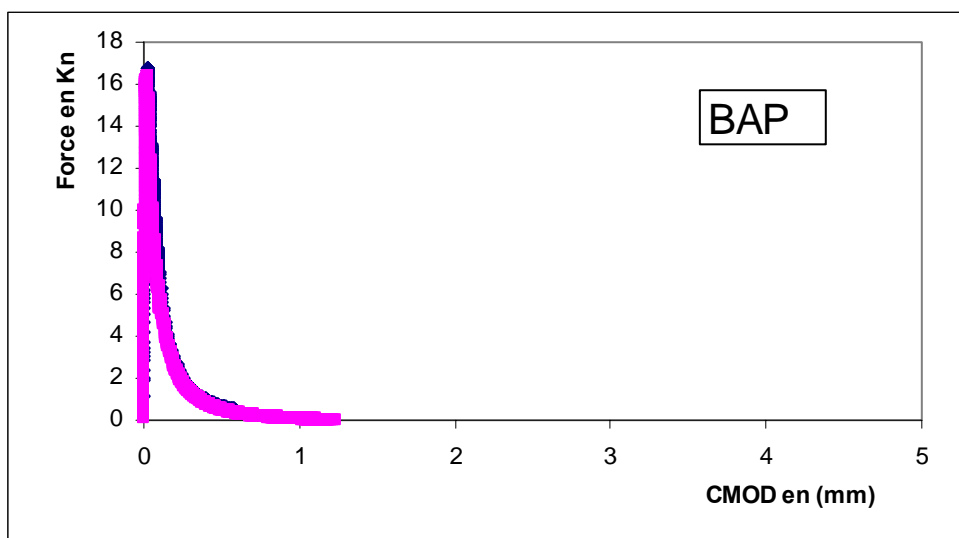
Mais pour les microfissures, l'essai d'arrachement n'est pas techniquement possible. Il est alors préférable de réaliser un essai de flexion trois points sur des éprouvettes recommandées par les normes en vigueur.

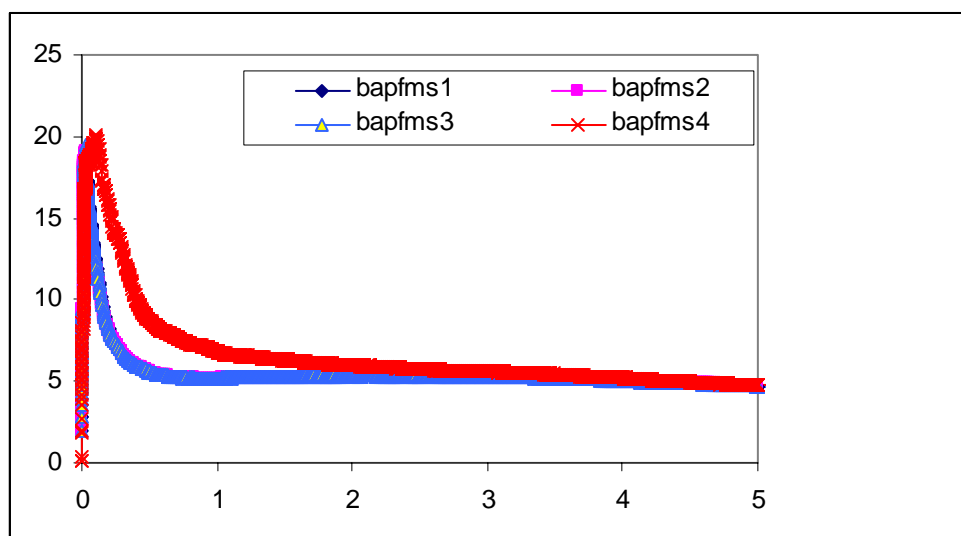
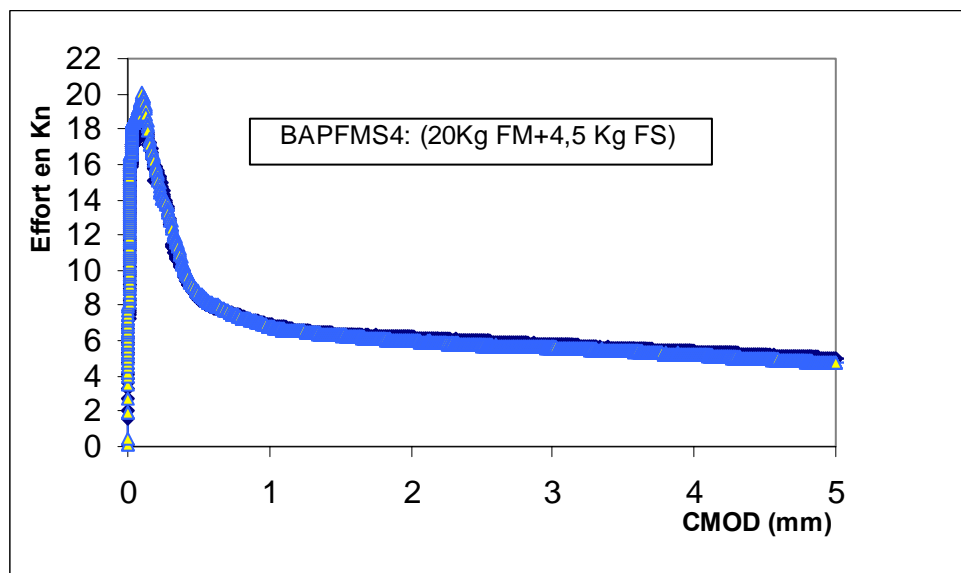
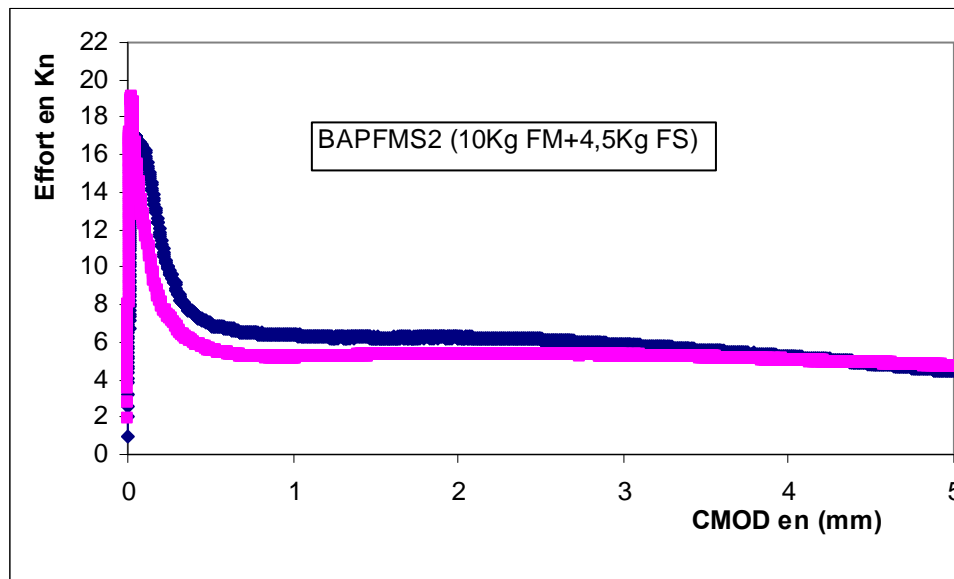
IV-5-4-2-2 : Résultats et discussions :

IV-5-4-2-2-1 : Courbes Effort-Cmod :

a) cas de différents dosages en fibres métalliques avec 4,5 Kg/m³ de fibres synthétiques :

Les résultats sont présentés sur les courbes de la figure IV-14





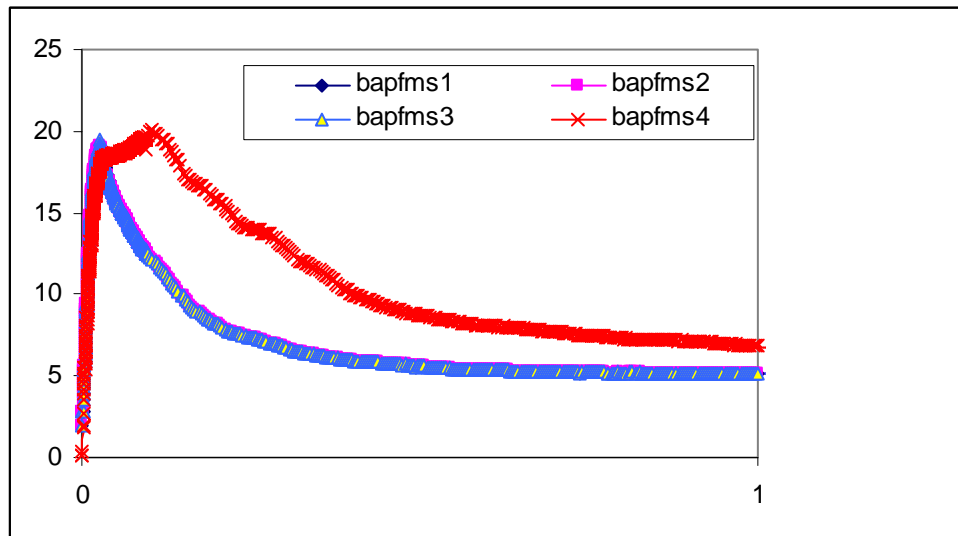


Figure IV-14 : Courbes « force-cmod » obtenues en flexion trois points sur éprouvettes entaillées : Influence du fibrage mixte

Si chaque type de fibres intervenait indépendamment de l'autre, la courbe effort-cmod présenterait de brusques sauts de rigidité et de résistance à chaque transition entre domaine d'efficacité des fibres. La résistance maximale serait atteinte dès lors à la fin du domaine pseudo-linéaire (vers 20Kn) correspondant à l'apport des fibres métalliques, puis chuterait pour repartir avec une rigidité propre au comportement d'un béton autoplaçant avec fibres synthétiques (comme le montre les courbes de la figure IV-14) avant de chuter à nouveau. Le comportement final serait d'un béton autoplaçant à fibrage hybride, et la capacité portante ne dépasserait pas les 20 Kn.

Le caractère mixte ou hybride permet le transfert d'efforts progressifs d'un type de fibre à un autre quand l'ouverture de fissure devient incompatible avec son domaine d'efficacité.

Le principe se caractérise par la mise en action graduelle et continue des différentes fibres et selon leur échelle, et ce jusqu'au pic de l'effort. Le nombre d'interface ne cesse donc de croître et l'effort d'augmenter. Au pic d'effort, le nombre de fibres sollicitées est maximal. Ceci est illustré dans les courbes de la figure IV-14 dans le cas des essais de flexion et peut schématiquement se décomposer en trois étapes.

Etape1

Le comportement pseud-élastique linéaire se poursuit bien au-delà de la résistance en traction par flexion de la matrice cimentaire sans véritable perte de rigidité. Cela se traduit par une fissuration extrêmement fine et diffuse dans l'ensemble de la zone tendue rendue possible par l'omniprésence des fibres métalliques au sein du composite. En conséquence, la matrice cimentaire n'est pas à proprement parlé endommagée.

Etape2

L'effort croît et on assiste à la coalescence de quelques microfissures suivant une répartition aléatoire. Cela marque le début de l'endommagement et la diminution de la rigidité. Mais la présence des fibres métalliques (fonte amorphe) permet un pontage efficace de ces microfissures. Si localement l'ouverture de certaines fissures a augmenté, le palier ductile ne cesse pourtant de croître grâce à l'intervention des fibres synthétiques. Et cela permet la poursuite du processus de micro-fissuration dans des volumes de matière jusqu'à là vierges.

Etape3

Certaines microfibrilles ne peuvent plus être pontées efficacement. Leur coalescence conduit à l'apparition de quelques macrofissures (toujours invisible à l'œil). Le processus de fissuration se reproduit pour des ouvertures de fissures plus importantes, intéressant les fibres synthétiques. Le pontage efficace de ces fissures, nécessairement moins nombreuses, permet une meilleure efficacité des fibres synthétiques qui, par ricochet, entraîne une zone pseudo horizontale qui n'est autre que la ductilité ou la capacité de déformation recherchée. Le tout est schématisé sur l'organigramme de la figure IV-15.

Le processus de fissuration s'apparente à l'effet « boule de neige ». L'effort augmente jusqu'au moment où le nombre d'interfaces intéressées cesse de croître. Ce pas est franchi lorsque l'ouverture d'une fissure dépasse le domaine d'efficacité des fibres synthétiques la pontant. Cela aboutit à la localisation de l'endommagement et l'apparition d'une fissure conduisant à la ruine de l'éprouvette.

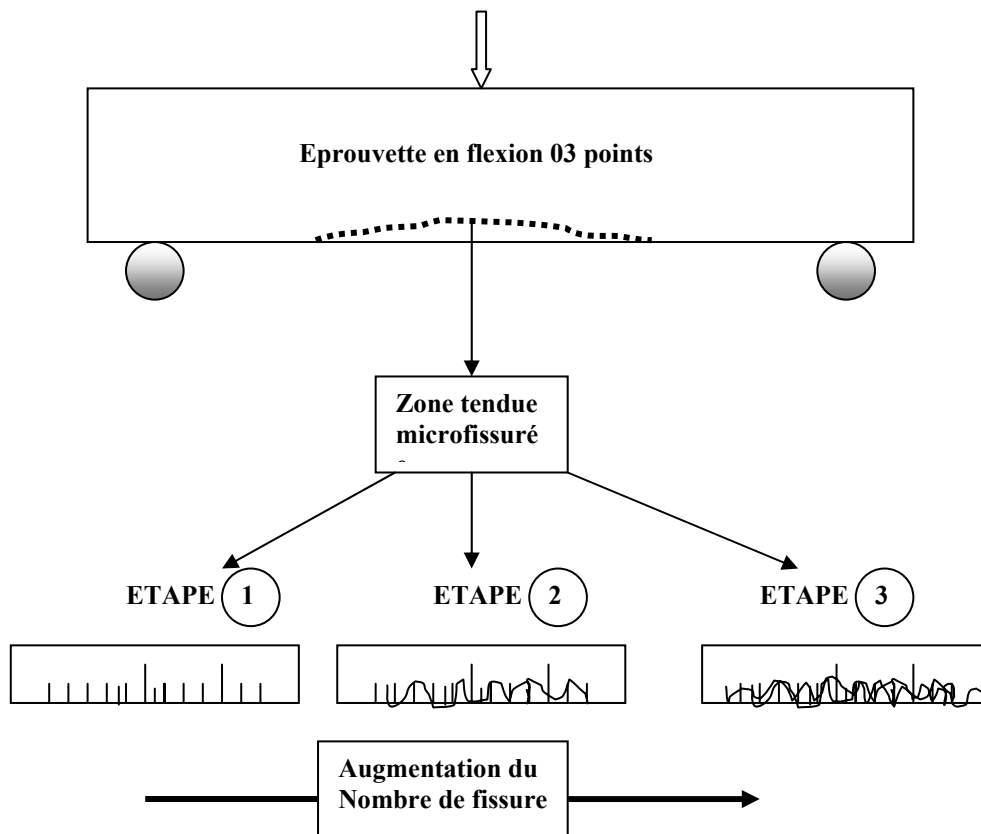


Figure IV-15 : Schéma du principe à caractère écrouissant par renfort mixte :

Il semble que les différences de comportement entre les quatre mélanges hybrides (mixtes), avec pourcentage de fibres métalliques croissant et pourcentage de fibres synthétiques constant s'observent essentiellement dans les derniers temps de la macrofissuration, puisque les écarts entre les courbes, apparaissent principalement au delà de 0,5 mm de flèche. En d'autres termes dans la zone de grande déformation, et la meilleur réponse a été enregistrée pour le BAPFMS4 (20 Kg/m³ FM+4,5 Kg/m³ FS).

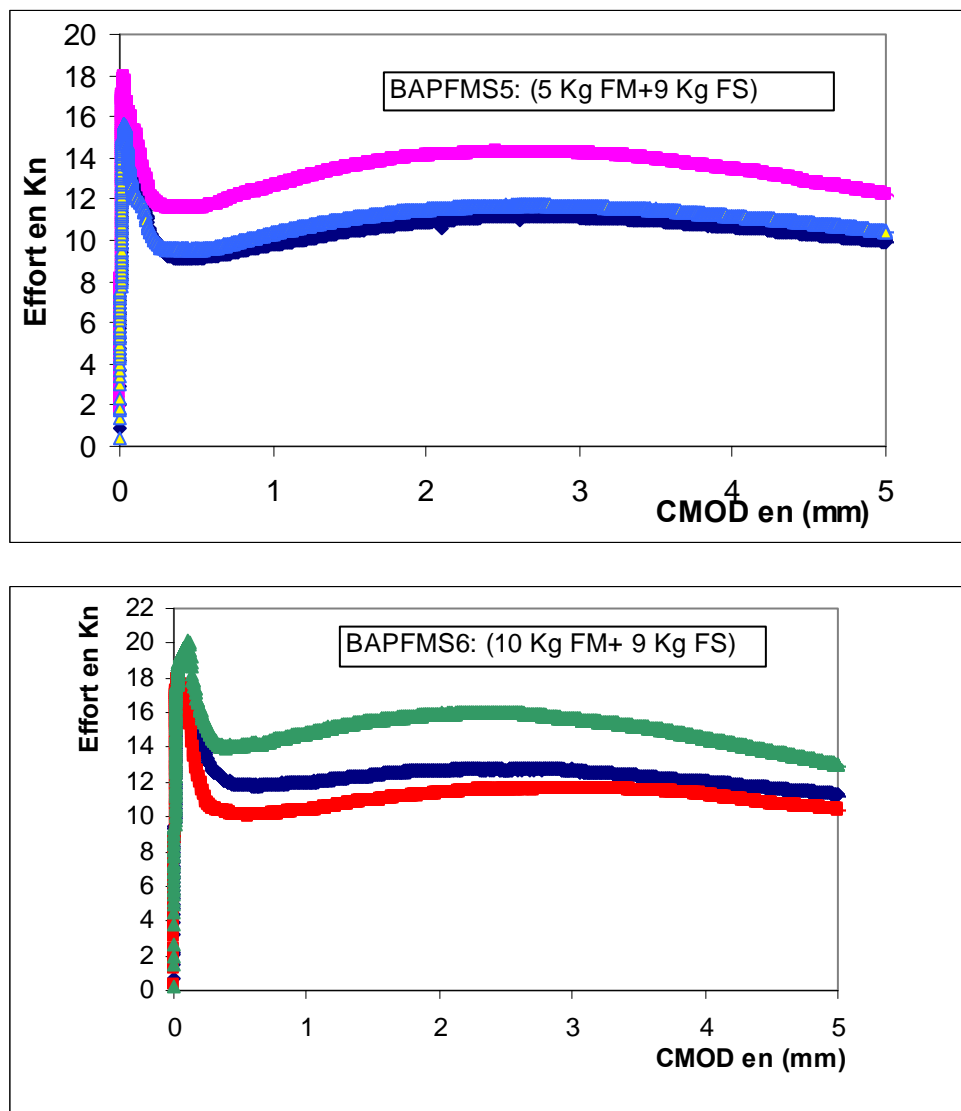
Effet des fibres sur la ductilité :

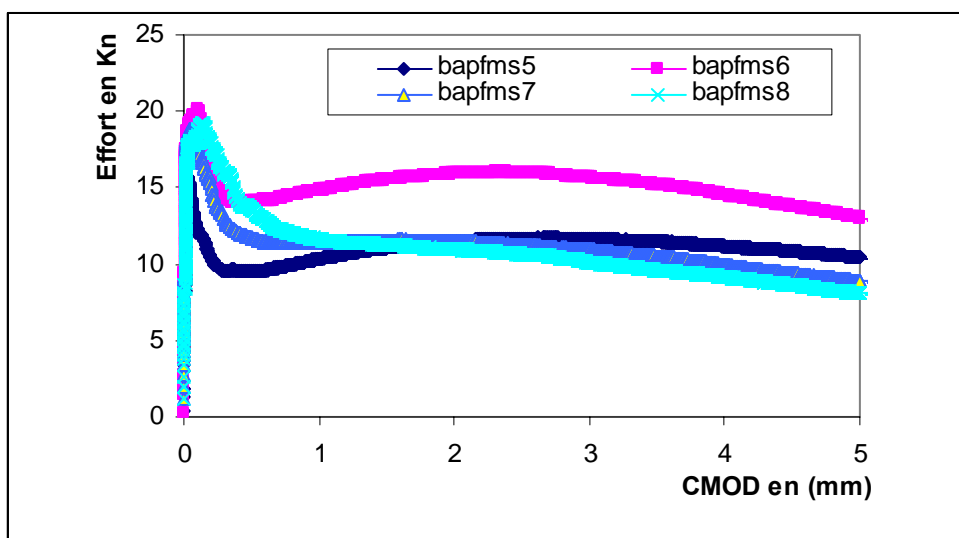
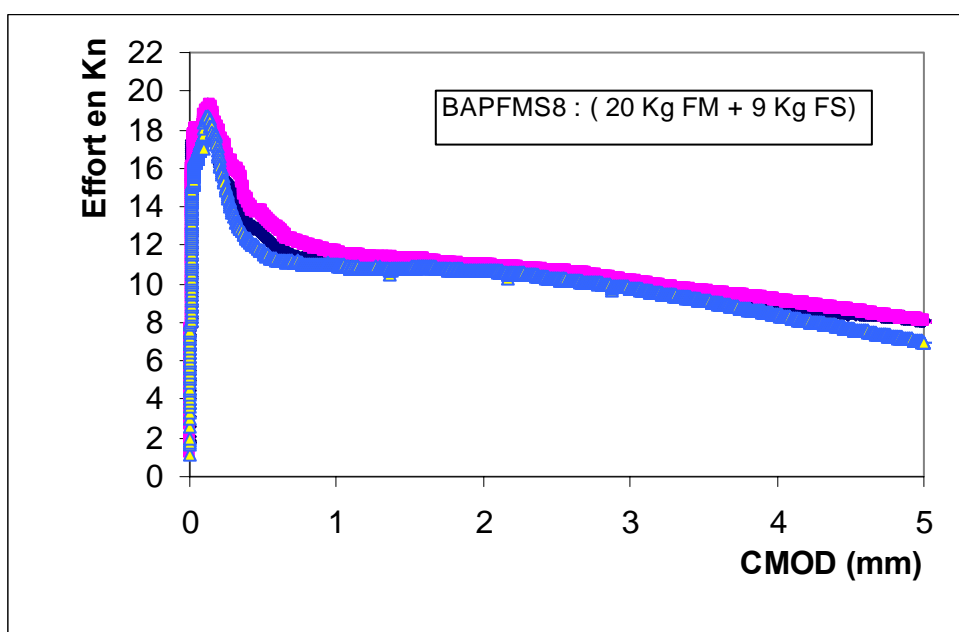
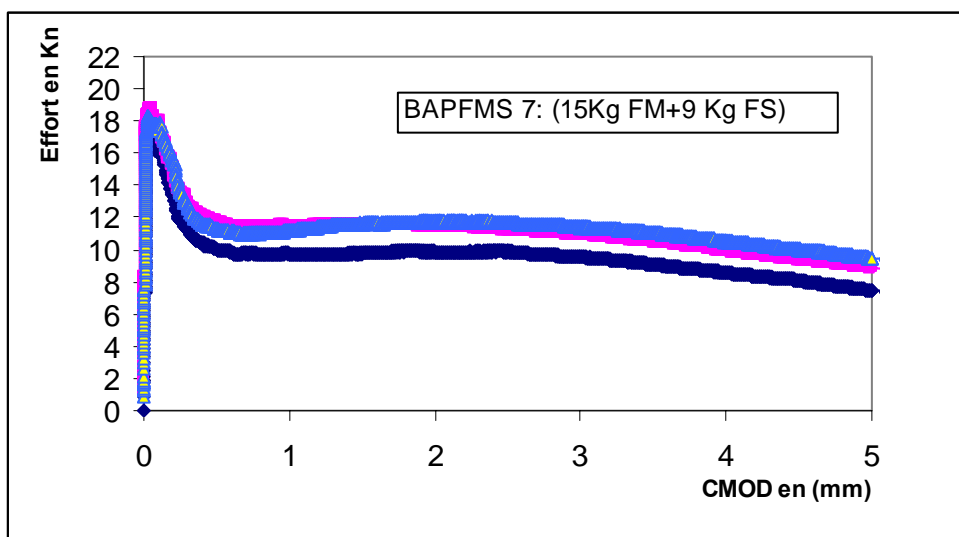
A l'exception du béton autoplaçant de référence, on peut voir que l'ajout des fibres contribue énormément à l'augmentation de la ductilité des bétons autoplaçants. Cependant l'incidence majeure a été enregistrée pour les bétons autoplaçants à fibrage mixte, ou on a pu remarquer un palier adoucissant (ductilité) très important après le pic de résistance maximale correspondant à l'apparition de la première fissure.

La déviation de la fissure se produit en présence de granulats. Elle est due aux variations locales de résistance, associées à une faible liaison aux joints de grains ou à la présence de contraintes résiduelles. La réorientation du plan de la fissure, dans une direction autre que celle perpendiculaire à l'effort appliqué, réduit sa progression. Cela se manifeste par une augmentation substantielle de la ductilité du matériau. La ductilité des matériaux cimentaires peut être augmentée par un changement de la microstructure qui intervient en avant du front de la fissure. Ces changements sont activés par un champ de contrainte autour du front de fissure. Ce mécanisme augmente considérablement la ductilité des bétons autoplacants à fibrage mixte.

b) cas de différents dosages en fibres métalliques avec 9 Kg/m³ de fibres synthétiques :

Les résultats sont illustrés sur les courbes de la figure IV-16





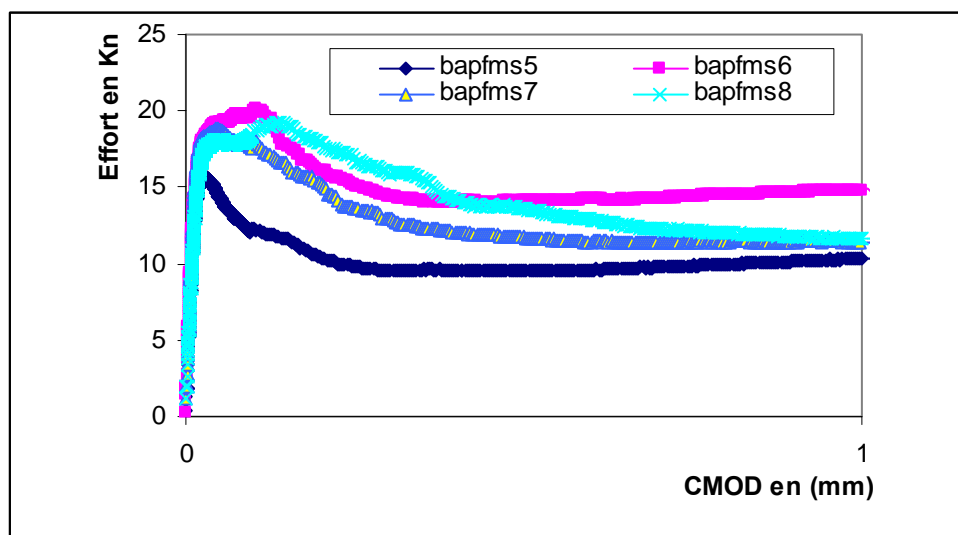


Figure IV-16: Courbes « Force-CMOD » obtenues en flexion trois points sur éprouvettes entaillées : Influence du fibrage mixte

Les deux types de fibres utilisées ayant leur domaine d'efficacité à des niveaux d'ouvertures de fissures différentes. Les résultats sont visualisés selon deux échelles : la première pour les ouvertures allant jusqu'à 1 mm, et la deuxième pour les ouvertures allant jusqu'à 5 mm. (Voir courbes de la figure IV-16).

On constate que les valeurs des résistances en flexion, les pentes de la zone de comportement – linéaire et les comportements post-pic sont fortement influencés par l'addition des fibres.

On peut observer que par rapport au mélange témoin, l'ajout de fibres métalliques se traduit par un gain de résistance, d'autant plus fort que ces fibres sont en plus grande quantité. De plus, le nouveau pic de résistance pour le **BAPFMS6** ($10 \text{ Kg/m}^3 \text{ FM} + 9 \text{ Kg/m}^3 \text{ FS}$) ainsi obtenu est plus arrondi et maintient une résistance élevée jusqu'à des valeurs d'ouvertures de fissures plus importantes.

Il est bien clair sur les courbes de la figure IV-16, que pour les mélanges mixtes, on trouve des situations intermédiaires : un gain appréciable de la résistance maximum due à l'apport des fibres métalliques adhérentes et une dégradation post pic ralentie et limitée par la présence des fibres glissantes en polypropylène.

Pour la tendance de comportement aux fortes ouvertures de fissures, jusqu'à 5 mm, associées à de fortes flèches. Dans ce domaine d'ouverture de fissure, alors que la résistance apportée par les fibres métalliques adhérentes devient quasiment nulle, les fibres synthétiques affichent leur meilleure performance.

Les résultats obtenus, montrent que les fibres métalliques à différents dosages procurent au composite cimentaire, qui est un matériau fragile, un renforcement efficace pour limiter la localisation des fissures. Ces mêmes fibres permettent ainsi d'accroître la résistance en flexion, et ne modifie cependant pas son comportement linéaire-élastique fragile. Les fibres synthétiques agissent quant à elles contre la propagation instable des fissures. Elles n'augmentent pas beaucoup la résistance de la matrice autoplacante mais lui procurent un comportement ductile. La figure IV-16 montre les courbes moyennes représentatives obtenues lors des essais de flexion avec les matrices renforcées de différents volumes de fibres métalliques et un volume de fibres synthétiques constant qui est de 9Kg/m³. On remarque que la ductilité, qui correspond à l'aire sous la courbe, a donné une excellente réponse pour BAPFMS6 et un comportement ductile durcissant est même obtenu. La capacité portante maximale a été enregistrée au niveau du BAPFMS8 avec 19,16 Kn, alors que BAPFMS6 a enregistré 19,01 Kn pour des flèches au centre respectivement de 0,05 mm. Si on considère la déformation totale du côté tendu des éprouvettes (déformation élastique, plastique et localisation des fissures), on détermine des contraintes maximales appelées LOP ou limite de proportionnalité qui sont mentionnées dans le tableau IV-6. Les valeurs des contraintes post – fissuration sont aussi mentionnées.

	LOP (N/mm ²)	$f_{Rj=1}$ (N/mm ²) Cmod1	$f_{Rj=2}$ (N/mm ²) Cmod2	$f_{Rj=3}$ (N/mm ²) Cmod3	$f_{Rj=4}$ (N/mm ²) Cmod4
BAPFMS1	5.968	1.76	1.669	1.673	1.623
BAPFMS2	6.08	2.23	1.992	1.967	1.773
BAPFMS3	6.176	2.217	2.022	1.984	1.779
BAPFMS4	6.128	2.728	2.026	1.867	1.753
BAPFMS5	5.696	3.238	3.744	3.958	3.884
BAPFMS6	6.08	4.15	4.473	4.592	4.416
BAPFMS7	5.952	3.667	3.7	3.665	3.448
BAPFMS8	6.13	4.02	3.52	3.34	3.056

Tableau IV-6 : Valeurs des contraintes maximales et contraintes résiduelles à différents pallier

Le comportement ductile avec des contraintes résiduelles résultants de ce renfort mixte peut-être interprété de la manière suivante :

L'endommagement des composites cimentaires renforcés par des fibres mixtes (métallique et synthétique) est caractérisé par la multifissuration de la matrice. Les fissures se propagent dans le matériau en contournant les renforts et en étant déviées aux interfaces renfort/matrice. L'ouverture d'une fissure (Figure IV-17), suite à l'accroissement de la sollicitation extérieure (parallèle à l'axe des fibres), est contrôlée par une fraction de fibre qui assure le transfert de charge. Ces fibres sont d'autant plus chargées que les lèvres de la fissure s'écartent et sont finalement rompues. La fraction de fibre qui assure le pontage diminue donc progressivement (car la résistance des fibres est distribuée) ce qui permet à la fissure de progresser. Le pontage réduit très fortement le facteur d'intensité de contrainte en fond de fissure matricielle, d'où le renforcement.

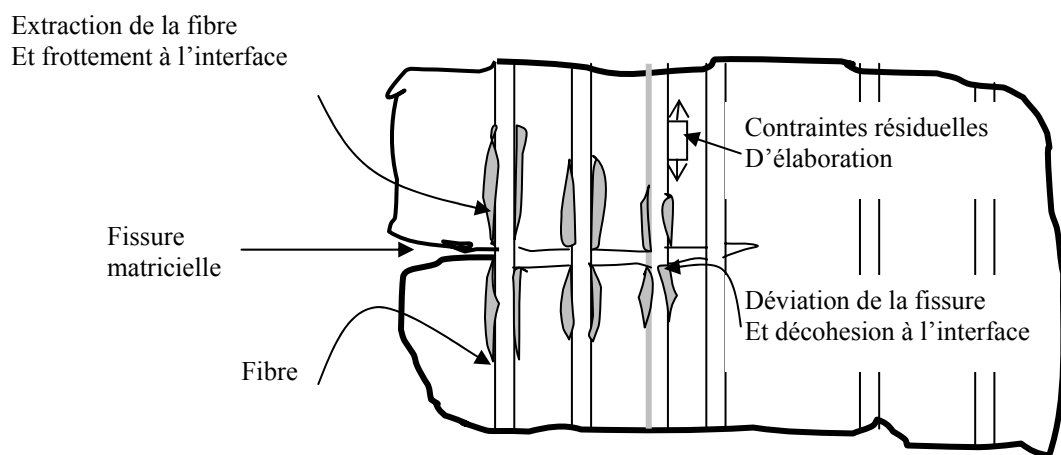


Figure IV-17 : Mécanisme d'absorption de l'énergie de fissuration dans les composites cimentaires fibrés.

La rupture des fibres s'effectue, pour la majorité, à l'intérieur de leur logement dans la matrice, loin du plan principal de la fissuration matricielle. A ce stade de la propagation de la fissure, une grande partie de l'énergie disponible pour propager la fissure est dissipée sous forme de création de nouvelles surfaces (décohésion aux interfaces fibres/matrice). Le reste de l'énergie disponible se dissipe sous les formes suivantes :

- Sous forme d'ondes acoustiques suite à la rupture de la plupart des fibres assurant le pontage de la fissure.
- Sous forme de frottement aux interfaces pendant l'allongement des fibres intactes et pendant l'extraction des fibres rompues jusqu'à la rupture totale du matériau cimentaire.

Les mécanismes, mis en œuvre pendant l'endommagement d'un composite unidirectionnel, sont intimement liés à la présence d'une liaison « contrôlée » entre le renfort et la matrice. L'effet du renfort peut être altéré si la liaison à l'interface est trop forte, de telle sorte que la fissure se propage dans le matériau en ignorant le renfort. Toutefois, il peut être fortement exploité si les portions décollées des fibres rencontrent une résistance au frottement à l'interface élevée. Cela conduit à des faibles longueurs de fibres qui seront extraites de la matrice. Ces situations ont été observées expérimentalement. [64]

Des composites cimentaires avec de grandes tolérances à l'endommagement ont été obtenus avec une interphase entre le renfort et la matrice. Cette interphase assure une liaison suffisamment faible pour que la fissure matricielle puisse dévier aux interfaces des renforts et, également, assez fortes pour assurer le transfert de charge entre la matrice rompue et les fibres qui assurent le pontage.

Nous constatons que le mécanisme de pontage des fissures, dans les bétons autoplaçants renforcés, dépend essentiellement d'une propagation dirigée de la fissure à l'interface renfort/matrice. Dans le cas d'un fibrage mixte, les mécanismes mis en œuvre sont plus efficaces et plus prépondérants vis-à-vis du renforcement mono-fibré.

Rôle de l'interface fibre/matrice :

L'idée de laisser propager les fissures au lieu de les éviter, pour augmenter la tolérance à l'endommagement dans les composites cimentaires, a permis de mettre en œuvre des matériaux à renforcement mixte dont le comportement jusqu'à la rupture n'est plus de type fragile. Cela est d'autant plus marqué que le renfort en fibrage mixte continu possède des architectures complexes (fibres enchevêtrées dans plusieurs directions).

Le principal objectif, recherché à travers l'utilisation des renforts hybrides (mixtes), est de prévoir à l'avance un grand nombre de surfaces pouvant être créées (pour minimiser l'énergie disponible) pendant la propagation de la fissure matricielle. Ces surfaces traduisent l'ensemble des aires occupées par les interfaces fibres/matrice. Elles dépendent, donc, de la fraction volumique de fibres mixtes (métallique et synthétique).

Cette technique de renforcement suppose que la fissure matricielle doit pouvoir être déviée aux interfaces fibre/matrice. Dans cette optique ou perspective, les expériences ont mis en évidence l'efficacité du mélange hybride, qui intervient simultanément à l'échelle du matériau et de la structure en deux points distincts :

- L'amélioration de la résistance de la matrice à l'égard de la fissuration, qui est générée par les fibres métalliques, permet non seulement d'améliorer le comportement en flexion,

mais également la résistance en compression des bétons autoplaçants. Les fibres métalliques sont alors efficaces pour retarder la formation et la propagation des microfissures formées aux sommets des granulats.

- D'autre part, les fibres synthétiques peuvent augmenter la résistance du béton autoplaçant en lui procurant un comportement ductile et par conséquent améliorer le comportement post-fissuration de façon considérable.

IV-6 : Contraintes Résiduelles :

Les courbes de la figure IV-16 permettent de constater que, avant le pic de chargement, tous les mélanges ont eu des comportements similaires. En revanche, chaque composition, en fonction du type de renfort fibré (simple ou hybride) a un comportement post pic qui lui est caractéristique. Nous distinguons deux zones différentes :

- La première zone comprise entre 100 μm (fin du pic de chargement) et environ 200 μm d'ouverture de fissure, dans laquelle les fibres métalliques de fonte amorphe apparaissent nettement plus efficaces que les fibres synthétiques. L'effort repris par 5 Kg/m^3 de fibres métalliques est environ le même que celui repris par 9 Kg/m^3 de synthétiques. Cette différence de comportement s'explique par le fait que les fibres de fonte amorphe, grâce à leur grande surface spécifique, adhèrent très bien à la matrice, et par conséquence une longueur d'ancrage constante de ces fibres est vite atteinte, alors que pour les fibres synthétiques, leur moins bonne adhérence conduit à l'existence d'une phase de glissement avant d'atteindre une longueur d'ancrage optimale.
- Une deuxième zone comprise entre environ 200 μm et 5000 μm (la limite de l'étude) d'ouverture de fissure, dans laquelle on observe une diminution de l'efficacité des fibres de type fonte amorphe, alors que l'efficacité des fibres synthétiques reste intacte. Et ceci s'explique par le comportement quasi élastique fragile des fibres métalliques qui conduit à la rupture des fibres. Par contre les fibres synthétiques ont un comportement élasto – plastique, elle présente un palier plastique non négligeable, et généralement la rupture plastique se fait par glissement des fibres.

Il a été aussi démontré que lorsque les fibres sont ajoutées, le composite obtenu présente le double avantage : de conserver ses propriétés intrinsèques et celles dues au renfort de fibres, c'est à dire une grande capacité portante résiduelle post-pic.

Les avantages traditionnellement attendus d'un renfort fibré ne sont pas remis en cause par l'incorporation d'un deuxième type de fibre. L'ensemble de ces résultats confirme que l'association de deux types de fibres est une solution pour concevoir un composite cimentaire d'un intérêt majeur dans tous les cas où la résistance à la fissuration est une priorité.

Les contraintes résiduelles à différents palier sont mentionnées dans le tableau IV-7 suivant en fonction des mélanges considérés.

	FM Kg/m ³	FS Kg/m ³	LOP (N/mm ²)	$f_{Rj=1}$ (N/mm ²) Cmod1	$f_{Rj=2}$ (N/mm ²) Cmod2	$f_{Rj=3}$ (N/mm ²) Cmod3	$f_{Rj=4}$ (N/mm ²) Cmod4
BAP	0	0	5.13	0.188	-	-	-
BAPFM1	5	0	5.47	0.53	0.087	0.020	0.017
BAPFM2	10	0	6.10	0.70	0.095	0.03	0.017
BAPFM3	15	0	6.10	1.26	0.270	0.088	0.034
BAPFM4	20	0	6.30	1.680	0.440	0.207	0.121
BAPFS1	0	4,5	5.41	1.373	1.414	1.428	1.412
BAPFS2	0	9	5.70	2.96	3.51	3.62	3.43
BAPFMS1	5	4,5	5.968	1.76	1.669	1.673	1.623
BAPFMS2	10	4,5	6.08	2.23	1.992	1.967	1.773
BAPFMS3	15	4,5	6.176	2.217	2.022	1.984	1.779
BAPFMS4	20	4,5	6.128	2.728	2.026	1.867	1.753
BAPFMS5	5	9	5.696	3.238	3.744	3.958	3.884
BAPFMS6	10	9	6.08	4.15	4.473	4.592	4.416
BAPFMS7	15	9	5.952	3.667	3.7	3.665	3.448
BAPFMS8	20	9	6.13	4.02	3.52	3.34	3.056

Tableau IV-7: Valeurs des contraintes résiduelles en fonction pour les mélanges considérés

Notations :

FM : fibres métalliques

FS : fibres synthétiques

LOP : Limite de proportionnalité (contrainte de traction par flexion maximale)

$f_{Rj=1}$: Résistance résiduelle à la traction par flexion, correspondant à CMOD=0,5 mm

$f_{Rj=2}$: Résistance résiduelle à la traction par flexion, correspondant à CMOD=1,5 mm

$f_{Rj=3}$: Résistance résiduelle à la traction par flexion, correspondant à CMOD=2,5 mm

$f_{Rj=4}$: Résistance résiduelle à la traction par flexion, correspondant à CMOD=3,5 mm

L'objectif global de cette étude étant de mettre en valeur l'apport des mélanges de fibres métalliques (fonte amorphe) et synthétiques (polypropylènes) à différents dosages : une non fibrée qui est le béton autoplaçant de référence, quatre avec simple fibres métalliques de dosage croissant (5, 10, 15, 20) Kg/m³ et deux avec simple fibres synthétiques de dosage aussi croissant (4,5 et 9) Kg/m³ et évidemment leurs huit formes hybrides. (Comme mentionnée au tableau IV-7).

Le matériau cimentaire autoplaçant bi-fibré a été caractérisé par l'amélioration de sa résistance à la traction par flexion et son comportement post-fissuration. Ces données indispensables pour pouvoir évaluer l'importance du fibrage mixte et déterminer les mélanges seuils à partir desquels les réponses mécaniques se manifestent et de là cerner un mélange optimal. Il apparaît expérimentalement que les meilleurs contraintes résiduelles aux différents paliers ont été données par BAPFMS6 (10 Kg/m³ FM + 9 Kg/m³ FS).

Pour les bétons autoplaçants mono – fibré les meilleures performances ont été enregistrées avec 20 Kg/m³ pour les fibres métalliques et 9 Kg/m³ pour les fibres synthétiques. Il y a lieu de noter aussi que les meilleures valeurs des contraintes résiduelles ont été enregistrées avec les fibres synthétiques pour les différents niveaux d'ouverture de fissures.

Et à titre d'information pour un cmod de 0,5 mm, le BAPFS2 a enregistré une contrainte résiduelle de 2,96 N/mm², alors que le BAPFM4 a donné une valeur de 1,68 N/mm², une amélioration de 76,24 %. Pour un cmod de 1,5 mm le BAPFM4 a donné une contrainte résiduelle de 0,44N/mm² et BAPFS2 une valeur de 3,51N/mm², une amélioration de 697,72% ; pour un cmod de 2,5 mm, le BAPFM4 a donné une valeur de 0,207N/mm² et le BAPFS2 une valeur de 3,62 N/mm² ce qui donne une amélioration de plus de 1000% et enfin pour un cmod de 3,5 mm le BAPFM4 a donné une contrainte résiduelle de 0,121 N/mm² et le BAPFS2 une valeur de 3,43 N/mm², soit une amélioration de plus de 2000%.

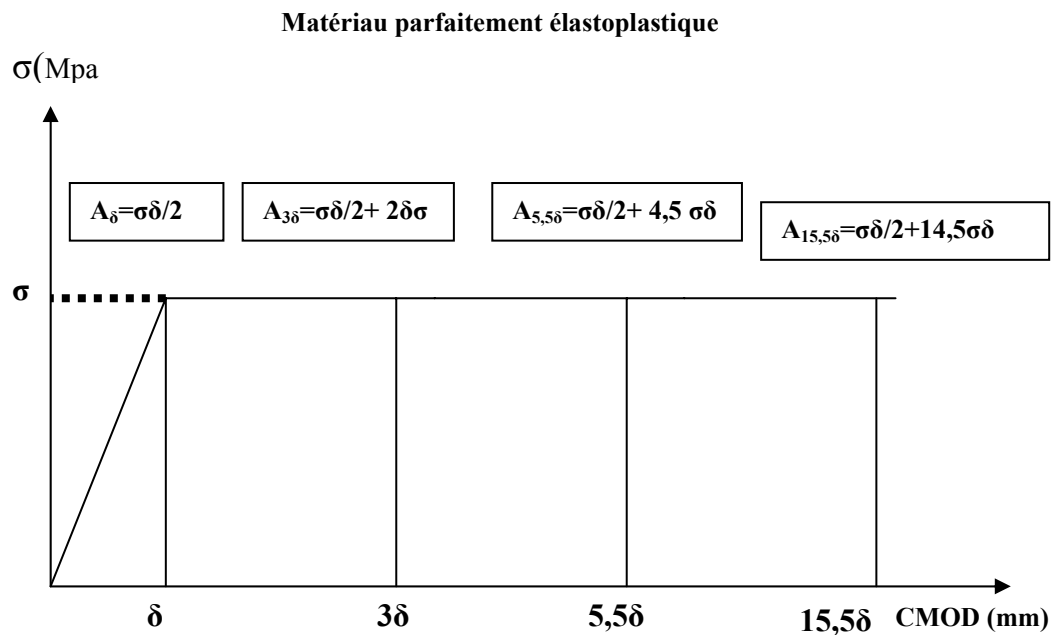
D'autre part, il semble exister un dosage seuil, en fibres métalliques avec les fibres synthétiques au delà duquel les résistances cessent d'augmenter. On observe en effet une perte d'efficacité des fibres métalliques au delà de 10Kg/m^3 lorsqu'elles sont associées à 9Kg/m^3 en fibres synthétiques. De plus, on peut affirmer que la distribution du squelette granulaire du matériau n'a pas été trop modifiée par un tel dosage, ce qui explique la capacité de déformation, la reprise de charge appréciable même à de grandes déformations (partie redescendante de la courbe) et de dissipation d'énergie du béton autoplaçant à fibrage mixte. La reprise de charge dans les matrices fissurées est fonction du frottement généré à l'interface fibre-matrice ; ce mécanisme a d'ailleurs fait l'objet de très nombreuses études portant sur les bétons renforcés de fibres plus ou moins longues [29]. Ce frottement augmente avec la longueur de la fibre et c'est ce qui explique que la ténacité du composite augmente avec la longueur des fibres. Des résultats récents obtenus à l'université Laval indiquent que certains traitements de surface permettent d'accroître la rugosité de surface des fibres et que cela permet d'augmenter significativement le frottement à l'interface fibre-matrice [66]. En soumettant les fibres à de tels traitements, on peut espérer améliorer de façon substantielle la ténacité des pâtes de ciment renforcées.

En effet, le BAPFMS6 a enregistré une meilleure performance relativement à tous les mélanges mono-fibrés et bi-fibrés formulés. Du tableau IV-4, on constate une amélioration de 6% pour le LOP, 40% pour contrainte résiduelle à 0,5 mm, 27,4% pour contrainte résiduelle à 1,5 mm, 26,8 % pour contrainte résiduelle à 2,5 mm et enfin 28,7% pour contrainte résiduelle à 3,5 mm et ceci comparativement à BAPFS2.

IV-7 : Approche énergétique :

La ténacité est la principale caractéristique par laquelle les bétons autoplaçants avec fibres se démarquent. Pour le béton autoplaçant sans fibres, la contrainte est nulle après la rupture. Par ailleurs, pour les bétons autoplaçants avec fibres, la contrainte diminue une fois la rupture du béton effectuée, mais une partie de l'effort est reprise au fur et à mesure que le déplacement augmente jusqu'à rupture des fibres. La charge de fissuration est supposée correspondre au pic de chargement, ainsi on pourra déterminer les indices de ténacité I_5 , I_{10} et I_{30} qui sont des rapports d'énergie, et qui sont calculés selon la norme ASTM C1018. Ils traduisent une comparaison avec un matériau parfaitement élasto – plastique (figure IV-18).

Dans cette section, nous allons confronter les résultats obtenus précédemment à une analyse par approche énergétique.



δ : ouverture de fissure de fin de comportement linéaire

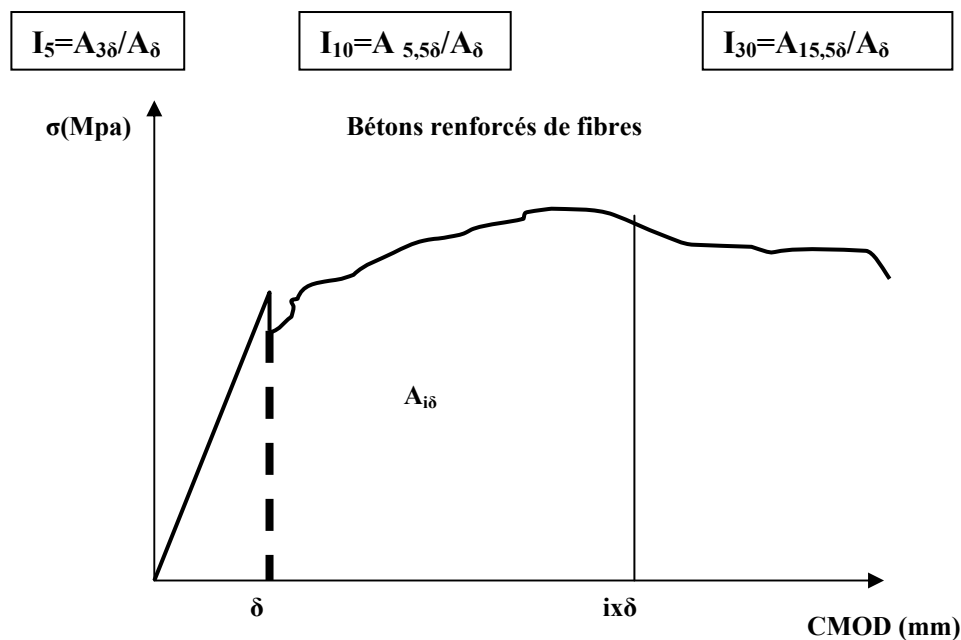


Figure IV-18 : Définition des indices de ténacité selon la norme ASTM C1018

Dans ce but, plusieurs méthodes sont préconisées et qui semble satisfaisante pour caractériser à la fois le composite cimentaire non renforcé par des fibres et le composite cimentaire renforcé par des fibres.

En effet, la méthode consistant à déterminer l'énergie spécifique de rupture à partir des éprouvettes encochées en flexion trois points, méthode discutable mais recommandée par la RILEM [67], est tout simplement inappropriée dans le cas des compositions renforcées par des fibres. Par ailleurs, les indices de ténacité préconisés par la norme ASTM C1018 pour caractériser le comportement du matériau en flexion ont prouvé leur efficacité.

Pour chaque composition l'énergie a été calculée, et nous en avons tiré la valeur moyenne. Cette énergie qui est un indicatif de la ténacité du matériau, particulièrement dans le domaine post-fissuration. Plus elle est grande et plus le matériau est tenace.

Pour les bétons autoplaçants fibrés et non fibrés les énergies totales consommées ont pu être calculées jusqu'à une ouverture de fissure de 5 mm. Les résultats sont présentés dans des tableaux et traduits ensuite sous forme de graphe barres.

IV-7-1 : Cas des bétons autoplaçants avec fibres métalliques :

Pour quantifier le comportement post-pic de toutes les compositions cimentaires autoplaçantes renforcées, une analyse énergétique peut- être mise à profit. Une méthode permettant de mettre en évidence le rôle joué par les fibres particulièrement au niveau de leur comportement tenace (résistance à la propagation brutale d'une fissure d'une entaille).

Pour les bétons autoplaçants mono fibré, les fibres métalliques (fonte amorphe) agissent après localisation de la microfissuration dont l'évolution est très rapide lors des premiers chargements. En effet les fibres nécessitent pour être mobilisées une certaine ouverture des fissures, qui se propagent, puis se stabilisent progressivement au fur et à mesure que le transfert d'effort s'effectue. En conséquence, elles interviennent sur l'apparition des fissures de première génération, en s'opposant très rapidement à leur ouverture du fait de leur très grande surface spécifique comparée à celles des fibres synthétiques. Et ceci s'explique par la croissance du taux de restitution d'énergies en fonction du dosage en fibres, comme le montre le graphe barre de la figure IV-19-a.

	δ	E_{δ}	E_t	I_5	I_{10}	I_{30}
BAP	0,023	0,422	2,55	3,12	5,03	6,35
BAPFM1	0,022	0,474	4,78	3,56	4,58	7,53
BAPFM2	0,026	0,61	5,5	3,46	5,12	7,35
BAPFM3	0,036	0,916	7,8	3,40	4,70	7,14
BAPFM4	0,035	0,891	11,27	3,63	5,41	7,68

Tableau IV-8 : Valeurs des énergies et des indices de ténacité

δ : **cmod** correspondant à la première fissure

E_{δ} : Energie développée jusqu'à un cmod égal à δ

E_t : Energie totale jusqu'à la rupture

I_5, I_{10}, I_{30} : sont les indices de ténacité.

Les grandes valeurs des indices de ténacité ont été enregistrées pour BAPFM4, ce qui concorde avec la logique des choses. En effet les I_5 , I_{10} , et I_{30} qui sont des indicateurs de résistance à la fissuration brutale ont prouvé que plus le volume de fibres augmente plus le composite est tenace comme le montre les valeurs reportées sur le Tableau IV-8.

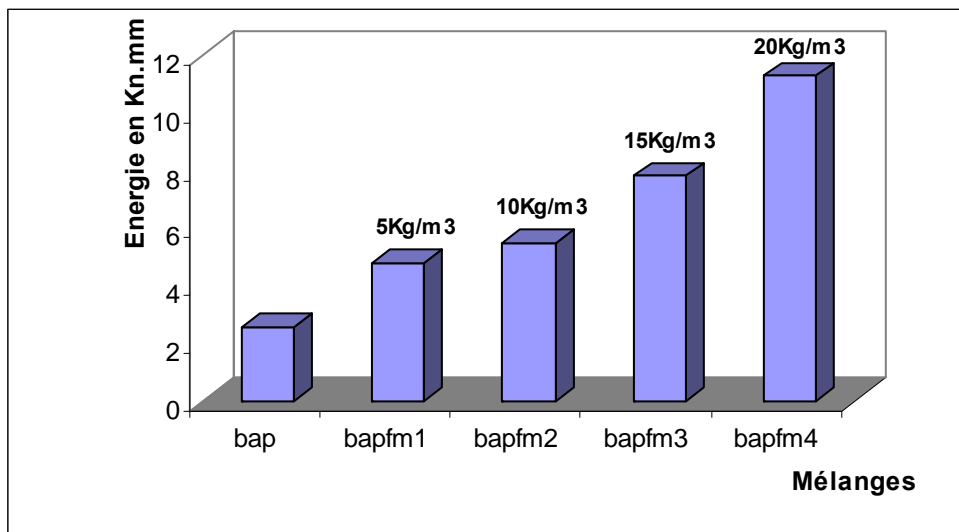


Figure IV-19-a : Variation de l'énergie de rupture en fonction du dosage en fibres métalliques

IV-7-2 : Cas des bétons autoplaçants avec fibres synthétiques :

Durant toute la période de rupture, le composite autoplaçant renforcé de fibres synthétiques a eu un comportement post – fissuration plastique, et on assistera à la création des fissures de

deuxième génération, qui seront à leurs tours prises en charge par les fibres synthétiques. Mais il faut noter, que les fibres métalliques, en agissant beaucoup plus rapidement sur la fissuration que les fibres synthétiques, conduisent obligatoirement à ce que les fissures de première génération soient plus fines et celles de seconde génération plus nombreuses.

L'accroissement des flèches (dans le cas des courbes effort – flèche) est due à la dégradation progressive des liaisons fibres-matrice mais aussi, dans le cas présent et pour une faible part, au fluage de la zone comprimée de l'éprouvette. Ces deux origines de l'évolution des déformations concourent à la propagation de la fissuration, et donc à la mobilisation d'une grande énergie de rupture.

Les deux dosages considérés, ont abouti à la même charge de rupture, par contre l'énergie a passé du simple au plus que le double comme le montre les valeurs du Tableau IV-9 et qui sont illustrées sur les graphes barres de la figure IV-19-b.

	δ	E_{δ}	E_t	I_5	I_{10}	I_{30}
BAP	0,023	0,422	2,55	3,63	5,03	6,35
BAPFS1	0,022	0,35	23,40	3,61	5,66	9,17
BAPFS2	0,023	0,451	57,58	3,71	6,85	9,88

Tableau IV-9 : Valeurs des énergies et des indices de ténacité

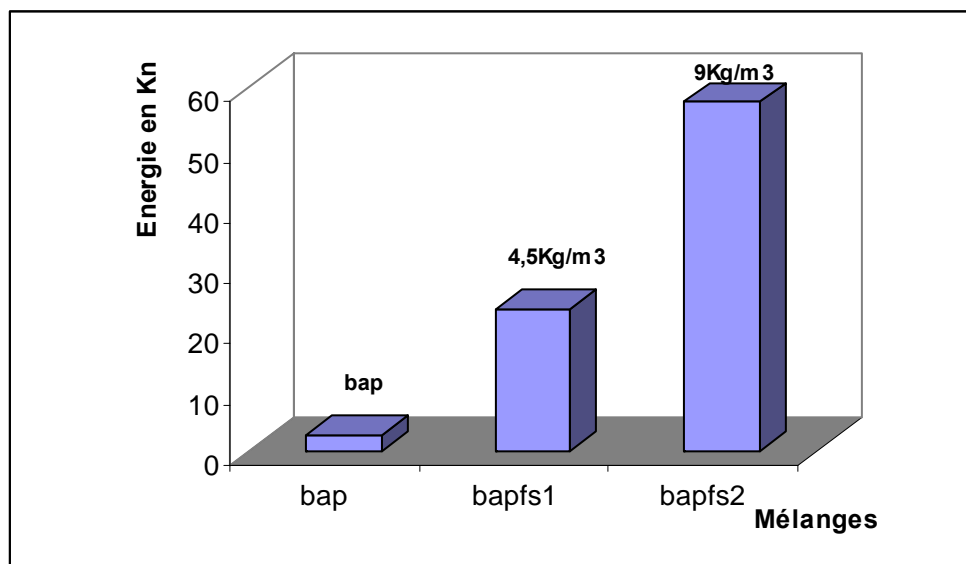


Figure IV-19-b : Variation de l'énergie de rupture en fonction du dosage en fibres synthétiques

IV-7-3 : Cas des bétons autoplaçants avec fibrages mixtes

a) Dosage en fibres métalliques variable et synthétiques constant et égal à 4,5Kg/m³

	δ	E_{δ}	E_t	I_5	I_{10}	I_{30}
BAP	0,023	0,422	2,55	3,63	5,03	6,35
BAPFMS1	0,021	0,38	31,28	3,80	6,33	10,24
BAPFMS2	0,027	0,558	33,33	3,45	5,14	8,57
BAPFMS3	0,029	0,666	36,00	3,33	5,21	9,19
BAPFMS4	0,053	1,225	38,53	2,93	4,54	8,25

Tableau IV-10: Valeurs des énergies et des indices de ténacité

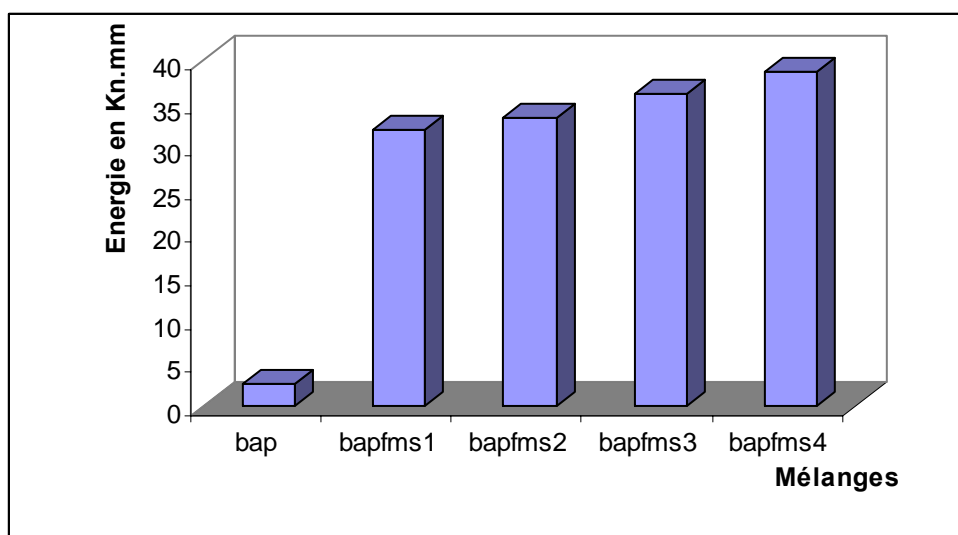


Figure IV-19-c : Variation de l'énergie de rupture en fonction du dosage en fibres mixtes

Il existe une littérature non négligeable concernant les énergies de ruptures des bétons à base de fibres métalliques soumis à différents types de sollicitation [68-69]. Ces études ont montré que les fibres augmentent l'énergie dissipée par la structure qui subit ce type de sollicitation, donc sa ductilité, et que cette augmentation est liée au pourcentage de fibres utilisées. La belle affaire ! Le contraire aurait été des plus étonnants au regard des connaissances acquises sur le comportement mécanique des Bétons autoplaçants fibrés à l'état durci.

En fait, il existe deux questions essentielles auxquelles la littérature n'apporte pas, aujourd'hui, de réponse satisfaisante. Ces questions peuvent se décliner ainsi :

- Est –ce que le rapport entre l'énergie dissipée par un béton autoplaçant fibré et un béton non fibré augmente, est identique ou diminue lorsqu'on passe d'une sollicitation à une autre ? En d'autres termes, est ce qu'il existe un apport spécifique des fibres vis- à -vis des différentes sollicitations.
- Comment se comportent les fibres au travers d'une fissure créée par une sollicitation, lorsque l'on soumet la structure fissurée à une autre sollicitation ? Est- ce que les fibres vont voir leur ancrage se détériorer jusqu'à conduire à une diminution de la capacité portante de la structure, et, dans ce cas, quelle est l'influence de paramètres tels que le pourcentage des fibres mixtes, le rapport ouverture de fissure par rapport aux longueurs des fibres.

En effet, le comportement ductile des bétons autoplaçants à fibrage hybride, permet une dissipation d'énergie considérable dans certaines sections choisies sans provoquer l'écroulement de la structure globale. Cependant, il est à noter que de telles structures peuvent subir, pour des séismes de faible magnitude, des déformations plastiques sans pour autant nécessiter une réparation de certaines sections. Ce qui explique la bonne tenue de ces composites cimentaires à de grands efforts. Les énergies dissipées ainsi que les indices de ténacité ont suivi une évolution similaire.

b) Dosage en fibres métalliques variables et synthétiques constant et égal à 9Kg/m³

	δ	E_{δ}	E_t	I_5	I_{10}	I_{30}
BAP	0,023	0,422	2,55	3,41	5,03	6,35
BAPFMS5	0,03	0,564	64,67	3,33	5,15	10,28
BAPFMS6	0,034	0,776	68,68	3,63	4,92	9,55
BAPFMS7	0,046	1,201	65,51	2,88	4,34	8,91
BAPFMS8	0,046	1,017	66,01	3,41	5,39	11,70

Tableau IV-11: Valeurs des énergies et des indices de ténacité

Le comportement des bétons autoplaçants à fibrages mixtes incorporant 9Kg/m³ de fibres synthétiques, était plus efficaces vis à vis de la quantité d'énergie mis en œuvre pour aboutir à une ouverture de fissure de l'ordre de 5mm. Et il est aisé d'admettre que, pour un séisme

donné, de tels bétons se comporteront mieux, et le degré d'efficacité des deux types de fibres est à l'optimum, et particulièrement pour le BAPFMS6 (10Kg/m^3 FM+ 9Kg/m^3 FS). Ceci s'explique par la zone de multifissuration observée en zone tendue après rupture en flexion, et il faut noter que les ouvertures sont nées faibles et ne peuvent être observées à l'œil nu. L'apparition d'une fissure unique est visible et qui coïncide avec le pic de l'effort (processus de localisation).

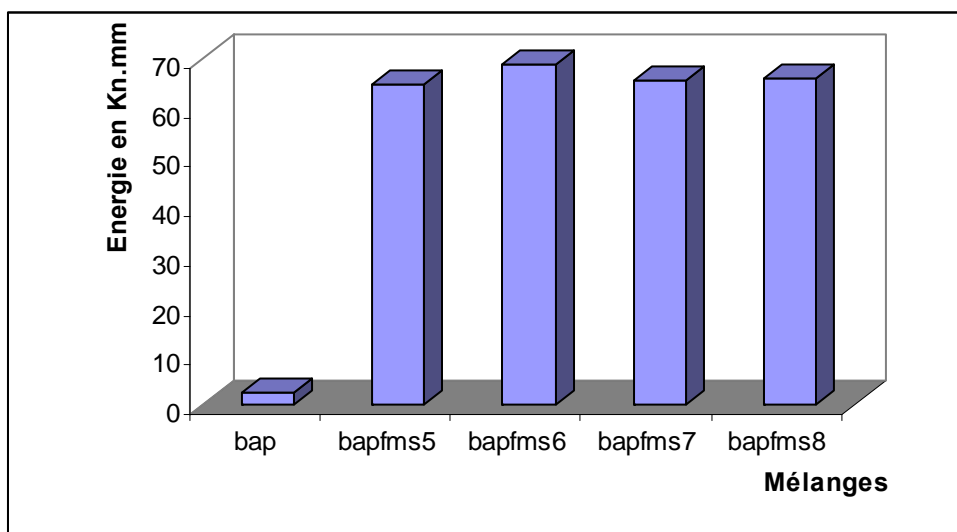


Figure IV-19-d : Variation de l'énergie de rupture en fonction du dosage en fibres synthétiques

IV-7-4 : Récapitulatif :

La figure IV-19-e montre les cas défavorables pour les quatre familles de mélanges autoplacants testés Bétons autoplacants à base de fibres métalliques, Bétons autoplacants à base de fibres synthétiques, Bétons autoplacants à fibrages hybrides (mixte).

En ce qui concerne l'énergie de rupture, les essais mettent en évidence une grande variabilité des résultats, et on a observé l'efficacité des fibres synthétiques quant au comportement ductile du matériau ainsi qu'à l'énergie de rupture.

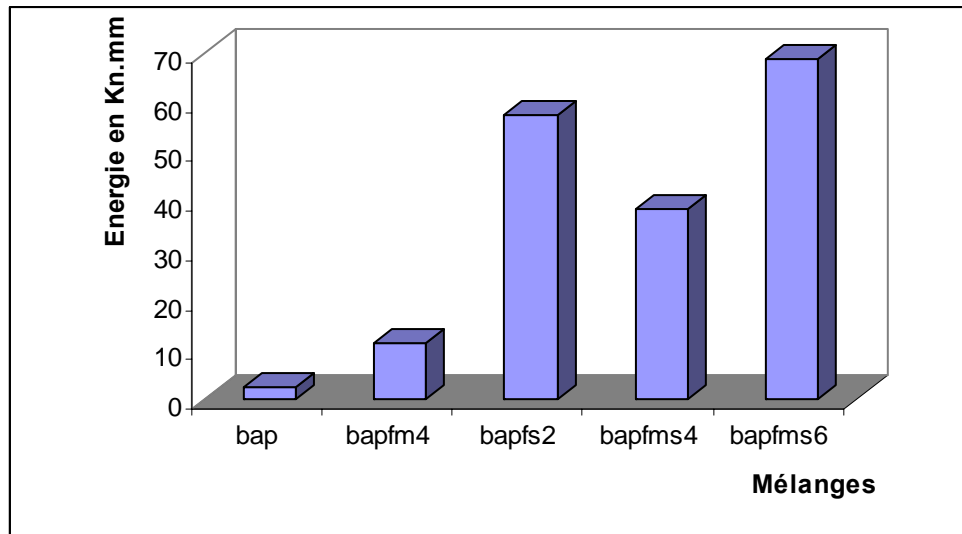


Figure IV-19-e : Variation de l'énergie de rupture en fonction du renfort mono et bi-fibré

On peut conclure de ces essais que l'ajout de fibres synthétiques en combinaison avec les fibres métalliques, n'augmente que légèrement le module de rupture, ou limite de proportionnalité (LOP) des bétons autoplaçants, mais il permet d'accroître de façon importante l'énergie de rupture et la résistance résiduelle. Les gains sont d'autant plus importants que les dosages en fibres synthétiques sont élevés. Ces résultats ne sont pas surprenants car ils confirment ceux obtenus par plusieurs recherches antérieures [29].

CHAPITRE V
VARIATIONS DIMENSIONNELLES ET PONDERALES
RETRAIT ET PERTE DE MASSE

V.1 INTRODUCTION :

Le retrait hydrique est thermique est l'une des causes à l'origine des déformations imposées conduisant au dépassement de la résistance en traction des matériaux cimentaires. C'est un phénomène très complexe, principalement consécutif à l'hydratation du ciment mais aussi aux échanges hydriques avec le milieu environnant tout au long de sa vie. Etant donné, les faibles résistances en traction des matériaux cimentaires, ce phénomène conduit généralement à la fissuration de l'élément mis en place.

De nos jours, différentes options sont offertes pour essayer de pallier cette pathologie et de limiter la fissuration des matériaux cimentaires. Certaines recherches se sont orientées vers un choix judicieux de la nature du ciment pour limiter le dégagement de la chaleur d'hydratation. D'autres options consistent à augmenter la résistance en traction des matériaux cimentaires (BHP) ou à diminuer le dosage en eau (BPR). Si le stade de la fissuration ne peut être évité, un renfort par des fibres constitue un levier pour limiter l'ouverture des fissures.

Dans notre travail, nous avons privilégié l'augmentation de la capacité de déformation : comme on le verra dans la suite, c'est une solution pertinente qui constitue une alternative prometteuse compte tenu des multiples intérêts en jeu.

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique, car il entraîne souvent l'apparition de fissures qui peuvent nuire à la durabilité du béton. Dans ce contexte, la fissuration au jeune âge favorise le transport d'agents agressifs au sein de l'ouvrage.

Les bétons spéciaux, tels que le béton à hautes performances (BHP) et les bétons autoplaçants (BAP), sont caractérisés par des compositions différentes de celles des bétons traditionnels. En raison du faible rapport E/C et/ou de la quantité élevée de fines des BHP et de certains BAP, les effets mécaniques du retrait endogène ou total apparaissent comme prépondérants vis-à-vis des effets des autres types de retrait.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les différents facteurs du mécanisme de fissuration due au retrait après prise. Nous définissons ensuite la notion de fissurabilité, terme employé pour décrire la prédisposition du béton à la fissuration. La fissuration est fortement dépendante de la formulation du béton ; nous donnons l'effet des principaux paramètres de composition sur les facteurs de la fissuration. Nous tentons enfin d'évaluer la fissurabilité des bétons autoplaçants à partir des données disponibles et des types de fibres et leurs dosages

respectifs. Et enfin, nous exposerons les résultats d'essais empêchés à l'anneau par lesquels nous avons confronté capacité de déformation et variations dimensionnelles de retrait, et qui nous ont permis de statuer sur l'influence de l'incorporation des différents types de fibres sur la fissuration et à quelle limite ces fibres contribuent à limiter la largeur des fissures dues au retrait précoce.

V-2 : Les différentes formes du retrait après prise :

Au cours de la phase « plastique », le béton a connu une première contraction volumique. Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait [70].

- **Le retrait thermique** : Les réactions d'hydratations libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle alors une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante.
A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de refroidissement. Contrairement aux variations de température, il n'y a donc pas réversibilité des contraintes engendrées par un empêchement des déformations. Il en résulte une contrainte de traction résiduelle, pouvant mener à la fissuration du béton.
- **Le retrait endogène ou d'autodessiccation** : Nous avons vu précédemment que l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.
- **Le retrait de séchage ou de dessiccation** est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique : après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.
- **Le retrait de carbonatation** : À la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation,

s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer : on parle de fâiçnage.

Nous avons choisi de limiter notre étude au retrait total. Le retrait endogène et de dessiccation peuvent être substituer par le retrait total. Quant au retrait de carbonatation se produisant sur une fine épaisseur à la surface du béton, il ne nuit pas à l'intégrité des structures.

a) Les mécanismes de l'hydratation :

Les phases anhydres du ciment portland sont relativement solubles dans l'eau et les réactions d'hydratation ne peuvent se produire sans passage de phases du ciment anhydre en solution dans la phase aqueuse pour donner des ions (Ca^{2+} , OH^- , Al^{3+} ). Les hydrates par contre sont beaucoup moins solubles. C'est pour cette raison que le ciment portland est susceptible de durcir sous l'eau. En 1887, le châtelier a proposé un mécanisme expliquant les réactions d'hydratations du ciment. En présence d'eau, les constituants anhydres du ciment donnent naissance à une solution sursaturée. Des hydrates se forment dans cette solution et précipitent en donnant des microcristaux (début de la prise). Les hydrates formés étant moins solubles que les composants anhydres, ceux-ci peuvent continuer à se dissoudre et à précipiter, de sorte que la réaction se poursuivrait jusqu'à la mise en solution de la totalité du ciment. Le durcissement serait alors dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

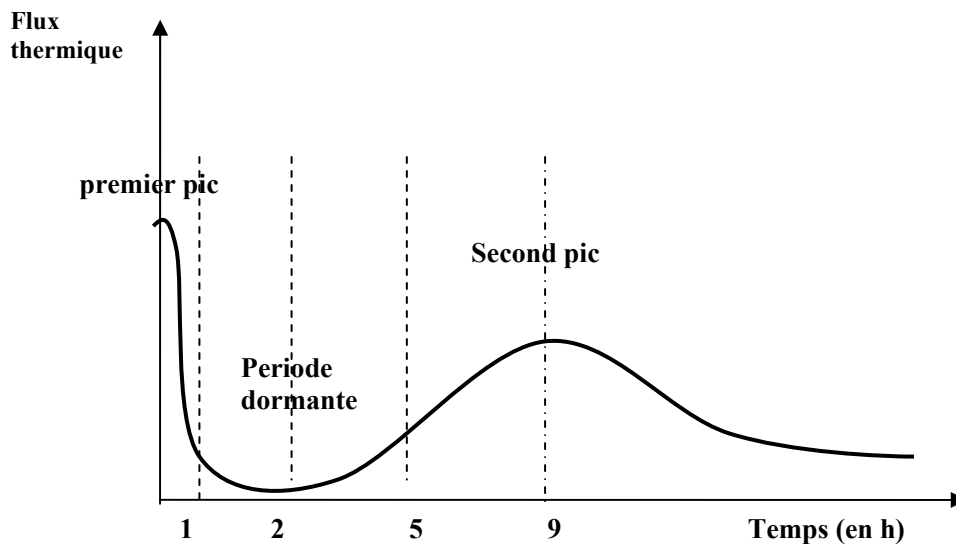
b) Le déroulement de l'hydratation :

Les réactions d'hydratations sont exothermiques. Le déroulement de l'hydratation peut être suivi par une courbe de flux thermique qui donne une mesure de la vitesse globale des réactions.

- Dès que le ciment est mis en contact avec l'eau, un dégagement de chaleur de quelques minutes se produit. Ce premier pic est attribué au passage en solution des ions provenant des constituants du ciment. Il y a formation de silicates de calcium hydraté (C-S-H) et d'ettringite à la surface des aluminates tricalcique (C_3A).
- Durant la période dormante, la formation des C-S-H et de l'ettringite se poursuit lentement. Cette phase correspond à la stabilité de la couche d'hydrates primaires.
- Quelques heures après le gâchage, un dégagement de chaleur commence à se produire. Les réactions de prise sont alors déclenchées par la précipitation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La fin de la prise est caractérisée par une accélération de l'hydratation.

- La période de durcissement (fin de la période de prise) débute par un épuisement du gypse. La solution interstitielle ne contenant plus cet élément, l'ettringite a tendance à former avec l'aluminate excédentaire du monosulfoaluminate, générant un second pic thermique [71].
- Une période de réaction lente succède à ces différentes étapes. Les grains de ciment sont recouverts d'une couche d'hydrates de plus en plus épaisse, ralentissant la diffusion de l'eau vers l'interface réactionnelle.

Et le tout est schématisé sur la courbe de la figure V-1.



FigureV-1 : Courbe type de flux thermique d'une pâte de ciment (d'après Loukili)

c) Nature des déformations libres du béton autoplaçant :

Le volume molaire total des produits d'hydratation du ciment est inférieur 8 à 12 % à celui des composants initiaux. Cette réduction absolue du volume survenant au cours de l'hydratation est connue sous le nom de contraction Le châtelier et ne dépend pas du rapport E/C.

Avant le début de prise, le volume de ciment frais est une suspension dense dont la forme extérieure s'adapte aux variations absolues de volume des constituants. A ce stade, la contraction Le châtelier n'est donc pas perturbé et les réductions absolues et apparentes du volume sont identiques et proportionnelles au degré d'hydratation du ciment.

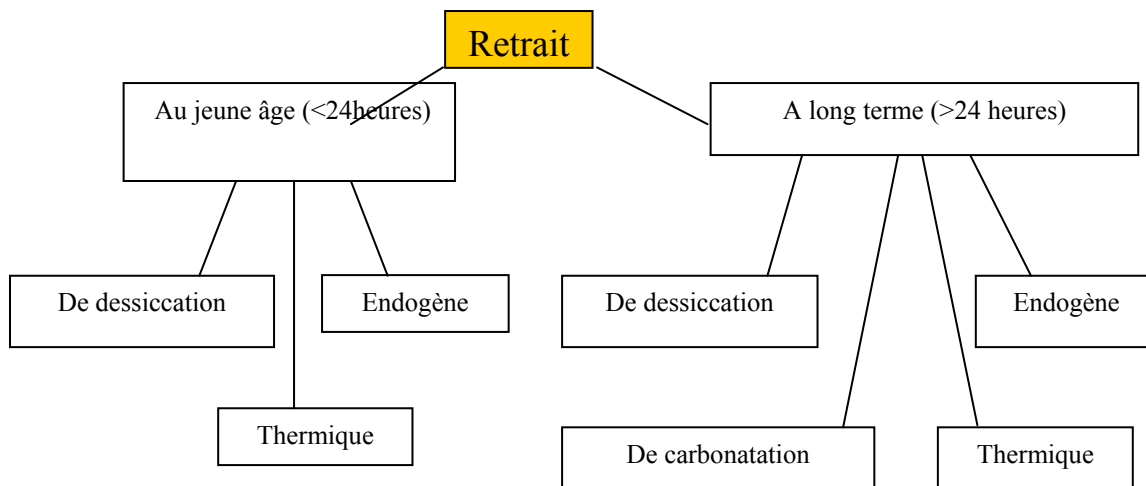


Figure V-2 : Différentes formes de retrait

A partir du début de prise, la contraction Le châtelier est progressivement entravée par la formation d'un squelette minéral de C-S-H. De plus, l'hydratation consommatrice d'eau, provoque une diminution de la teneur en eau liquide dans un espace entravé qui, par conséquent devient poreux. La réduction apparente du volume de la pâte de ciment est donc inférieure à la réduction absolue de volume prévue par la contraction Le châtelier. L'eau ne pouvant plus occuper tout le volume offert, une phase gazeuse apparaît dans les pores, ainsi que des ménisques aux interfaces liquide-gaz. Des tensions capillaires dues à la présence des ménisques provoquent une mise en compression du squelette minéral rigide qui contribue aux réductions absolues et apparentes du volume au cours de l'hydratation. Cette réduction de volume supplémentaire est appelée le retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment (comme mentionné sur l'organigramme de la figure V-2).

On distingue également au cours « des premières heures d'existence » d'un matériau cimentaire une phase de gonflement. Ce dernier est observé après la prise et est consécutif à la constitution des hydrates tels que la portlandite qui se fait avec une augmentation de volume. Les réactions d'hydratation qui comme nous l'avons explicité précédemment sont très exothermique induisent une dilatation du matériau cimentaire. Le retour à une stabilité thermique provoque une contraction du matériau, que l'on définit comme étant le retrait thermique.

Enfin, on parle de retrait de séchage ou de dessiccation, causé par l'évaporation d'une partie de l'eau contenue dans la pâte de ciment. L'évaporation de l'eau est générée par un déséquilibre d'humidité entre le matériau et le milieu environnant. Ce type de retrait (retrait

plastique) peut se produire lorsque le béton frais, en cours de prise, subit une dessiccation par les faces non coffrées. La déformation apparaît dès que la surface exposée est exempte d'eau de ressuage. Le retrait de séchage est aussi caractéristique de l'état du matériau après prise. Dès le décoffrage, si l'humidité ambiante est inférieure à celle qui règne dans la porosité du matériau, des migrations d'eau se produisent de l'intérieur vers l'extérieur de la structure.

V-3 : Effets de la formulation sur la fissurabilité :

V-3-1 : Données expérimentales :

Les données sur l'influence de la formulation sur le retrait et le fluage sont nombreuses dans la littérature. Cependant les études relatives aux bétons autoplaçants fibrés et bi-fibrés restent toujours des approches à l'état primitif. Pourtant, il faut reconnaître qu'en dehors des grands paramètres (E/C, volume de pâte, nature des granulats) les résultats expérimentaux sont souvent contradictoires ; il est ainsi parfois difficile de cerner les grandes tendances. A l'opposé, les données sur les paramètres de la rupture sont plus rares. L'énergie de fissuration semble cependant évoluer dans le même sens que la résistance à la compression [72].

Pour dresser le tableau de l'influence de la formulation, nous nous appuyons ici sur les données regroupées dans les ouvrages de Neville [73] et de Baron et ollivier [55]. Les autres références sont précisées dans le texte. Nous donnons de plus l'explication physique des effets quand elle est disponible ou suffisamment admise par la communauté scientifique.

○ Rapport E/C :

- *Le retrait endogène* est une fonction décroissante du rapport E/C. Les réactions d'hydratation ont un besoin en eau limité ; le rapport E/C minimal pour hydrater l'ensemble du ciment est d'environ 0,25. On considère qu'au dessus de 0,4, l'hydratation n'occasionne pas de forte baisse d'humidité relative, et donc pas de retrait important.
- *Le retrait de séchage* est une fonction croissante du rapport E/C, parce que la diffusivité, qui contrôle les transferts d'humidité, augmente avec la porosité. Sur la plage [0,35-0,5], l'effet du rapport E/C est assez faible [74]. Au-delà de 0,6, l'effet est plus marqué.
- *Le fluage total* augmente avec le rapport E/C.
- *Le moule élastique* diminue lorsque le rapport E/C augmente, comme la résistance à la compression.

- *Les paramètres de rupture* : l'augmentation de la porosité avec le rapport E/C se fait au détriment de la résistance. L'énergie de fissuration G_f est donc fonction décroissante du E/C. En revanche, le béton est plus ductile, lorsque sa porosité augmente [75].
- **Bilan** : Le rapport E/C a des effets contradictoires sur les facteurs de la fissurabilité. Cependant, il est reconnu que l'augmentation du E/C est néfaste pour les bétons de résistances courantes ($E/C > 0,5$), à cause de l'augmentation du fluage. Lorsque le rapport E/C est inférieur à 0,4, la fissurabilité est aussi plus grande, notamment au jeune âge, à cause d'un retrait endogène élevé et d'un fluage faible, malgré une résistance importante.

○ **Volume de pâte :**

- *Le retrait total* est une fonction croissante du volume de pâte, parce que les granulats ne connaissent pas de retrait. Le volume de pâte est un paramètre majeur contrôlant le retrait du béton (pour des constituants donnés) ; son influence est plus grande que le rapport E/C [75].
- *Le fluage total* augmente avec le volume de pâte. La raison en est, comme pour le retrait, que seule la pâte flue. Le volume de pâte est aussi le paramètre principal jouant sur le fluage.
- *Le module élastique* diminue avec le volume de pâte. Les granulats sont en général 3 à 15 fois plus rigides que la pâte [4].
- *Les paramètres à la rupture* : La résistance a tendance à diminuer lorsque le volume de pâte augmente [76]. Il est par conséquent probable que l'énergie de fissuration diminue avec le volume de pâte. Les études numériques montrent que l'énergie de fissuration d'un matériau composite diminue avec le volume d'inclusions, parce que la progression d'une fissure est gênée par toute inclusion [77].
- **Bilan** : Comme le rapport E/C, le volume de pâte a également des effets contradictoires sur les effets de la fissurabilité.

- **Effets des additions** : Il existe différents types d'additions. Les plus courantes sont les fillers calcaires, les cendres volantes, et la fumée de silice, qui sont utilisées en général pour diminuer le coût du béton en remplacement d'une partie de ciment, ou

pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation. On utilise principalement la fumée de silice pour obtenir des bétons à hautes performances, par augmentation de la compacité ou effet pouzzolanique.

Les appellations citées ci-dessus se réfèrent à une origine minéralogique ; les additions portant la même appellation peuvent donc être très diverses. La granulométrie et la forme des grains dépendent par exemple du procédé de fabrication. Cela explique sûrement pourquoi certains résultats de la littérature se contredisent.

Commençons par la fumée de silice qui a fait l'objet du plus grand nombre de recherche. Elle a pour effet d'augmenter la fissurabilité des bétons. Malgré le gain de résistance, les bétons contenant de la fumée de silice présentent moins de fluage de dessiccation et un retrait endogène plus important au jeune âge.

Les cendres volantes sont des déchets industriels. Leur effet le plus notable est d'augmenter la résistance à long terme par réaction pouzzolannique. Le retrait ne semble pas être influencé par leur présence. Il n'y a toutefois pas de consensus dans les résultats. Certaines cendres réduisent le retrait total, parce qu'elles possèdent une propriétés expansives [78]. En général, le fluage n'est pas trouvé modifié par les cendres, même si certaines publications font état d'une augmentation [79].

Les études sur les fillers calcaires sont plus rares, car leurs dosages dans les bétons ordinaires sont relativement faibles. C'est surtout le développement des bétons autoplaçants qui a suscité récemment un nouvel intérêt pour les fillers. Citons justement des résultats obtenus sur des BAP. Le retrait de séchage peut diminuer avec l'emploi d'un filler calcaire, si sa finesse permet d'augmenter la compacité du squelette, et donc réduire les transferts d'humidité [80]. Certains fillers semblent au contraire augmenter le retrait des bétons autoplaçants [81].

- **Effets des adjuvants :** Il existe différents types d'adjuvants. Les plus courants sont les réducteurs d'eau (plastifiants et superplastifiants), les retardateurs/accélérateurs de prise et les entraîneurs d'air.

Les réducteurs d'eau ne semblent pas avoir d'influence directe sur la fissurabilité. Leur effet est plutôt indirecte, dans le sens où leur utilisation permet de diminuer le rapport E/C. Les retardateurs ou accélérateurs de prise n'ont pas non plus d'effet direct. En

revanche, ils modifient la cinétique du durcissement des propriétés mécaniques et par conséquent la cinétique des contraintes dues au retrait au jeune âge.

Les entraîneurs d'air augmentent la porosité du béton, entraînant une diminution de résistance. Ils augmentent aussi le fluage. Concernant le retrait, les résultats divergent. Pour certains, les entraîneurs d'air n'ont pas d'effet sur le retrait, ce qui est à priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par diffusivité du matériau. Leur utilisation a d'ailleurs été proposée dernièrement pour réduire les gradients de retrait des dalles minces, et ainsi minimiser le phénomène de tuilage [82].

V-3-2 : Apport des fibres :

Les fibres, qu'elles soient métalliques ou synthétiques, sont régulièrement utilisées dans le béton. Les fibres métalliques sont particulièrement utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques. En plus de contrôler la fissuration (jeune âge et retrait de séchage), les fibres d'acier ou polypropylène peuvent augmenter d'autres caractéristiques intrinsèques des bétons autoplaçants.

V-3-3 : Apport de la réglementation :

Dans divers règlements internationaux, retrait et fluage sont modélisés par des lois empiriques, qui sont fonction des conditions de séchage (humidité extérieure), de la géométrie des pièces (prise en compte de l'effet d'échelle sur le séchage), et de paramètres caractéristiques du matériau, comme la résistance à la compression et le module élastique. Par conséquent, pour des conditions extérieures et une géométrie donnée, deux bétons présentant la même résistance ont théoriquement la même fissurabilité.

Il existe certes des aménagements pour prendre en compte la spécificité de certains bétons. Mais globalement, la fissurabilité d'un béton ordinaire est « réglementairement » déterminée par sa résistance.

V-4 : Retrait à l'état durci:

L'étude du retrait à l'état durci consiste à suivre les variations dimensionnelles résultant des mouvements hydriques au sein du matériau et ayant pour cause, soit les variations structurales du matériau lui-même, soit des échanges avec le milieu ambiant. On distingue le retrait total du retrait endogène. Le premier correspond aux variations dimensionnelles globales d'une éprouvette libre de toutes contraintes et d'échange avec le milieu ambiant. C'est une déformation apparente puisqu'elle intègre la fissuration de peau. Dans le second, des

dispositions expérimentales sont prises pour empêcher les échanges hydriques entre l'éprouvette et le milieu environnant. L'écart entre le retrait total et le retrait endogène est appelé retrait de dessiccation : il traduit l'effet des échanges hydriques avec l'extérieur.

V-4-1 : Dispositif expérimental :

Nous avons suivi en fonction du temps la variation de la longueur d'éprouvettes prismatiques de dimension 7x7x28 cm. Après la mise en place des bétons autoplaçants dans les moules, ces derniers sont conservés dans une salle humide durant 24 heures comme montré sur la figure V-3.



Figure V-3 : Eprouvettes dans la salle de retrait

La première mesure, qui servira de mesure de référence, est toujours réalisée 15 minutes après le démoulage. Il existe donc un « trou noir » d'une durée de 15 minutes. En terme de temps, cette période est courte et son incidence peut-être considérée comme négligeable. Le cas échéant, seul un choc thermique au moment de démoulage pourrait induire des variations dimensionnelles qu'il convient d'évaluer si elles sont significativement différentes d'une

composition à une autre. Dans un travail largement consacré à l'étude du retrait, Sarkis [83] a démontré que pour s'affranchir des effets de l'instabilité de la température des corps d'épreuve, la première mesure devrait être réalisée 3 heures après le démoulage. Cette démarche nous semble critiquable dans le sens où ce qui se passe durant ces trois heures fait partie de l'histoire du matériau et affecte son comportement.

Pour les mesures de longueur des éprouvettes, ces dernières sont munies de plots sur leur face extrême. Ces plots placés dans les moules avant la mise en place du matériau permettent à chaque mesure d'assurer le contact de chaque extrémité de l'éprouvette avec les palpeurs de l'appareil de mesure (rétractomètre). L'incertitude de mesure de ce dispositif illustré par la figure V-4, est de $\pm 5\mu\text{m}$.

Ainsi, le retrait total a été mesuré sur des éprouvettes brutes de décoffrage (fig V-4). Sachant que nous nous sommes intéressés qu'au retrait total et qui nous a semblé touché la réalité du terrain.

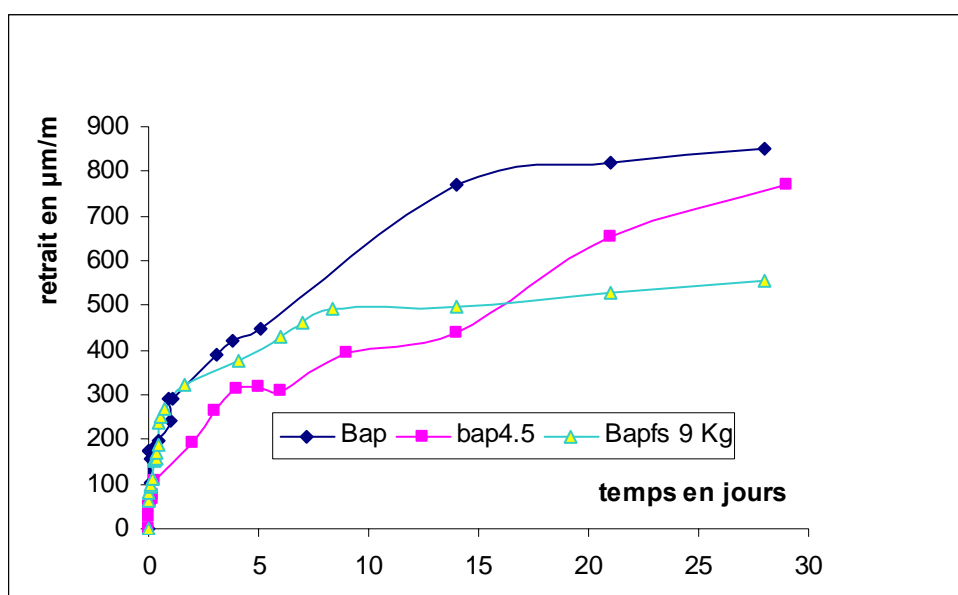


Figure V-4 : Appareil de mesure de retrait

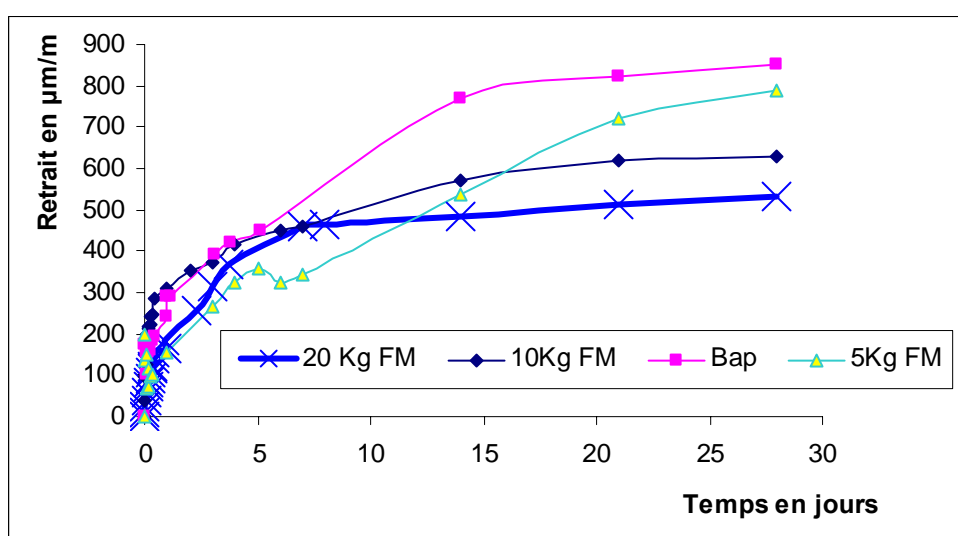
Dans les sections suivantes sont présentés les résultats obtenus sur une période de 28 jours. Comme dans les chapitres précédents, nous présenterons l'influence des fibres et de leurs associations à différents dosages sur le retrait total. S'agissant des courbes présentées, chaque valeur correspond à la moyenne des valeurs obtenues sur trois échantillons.

V-4-2 : Retrait total :

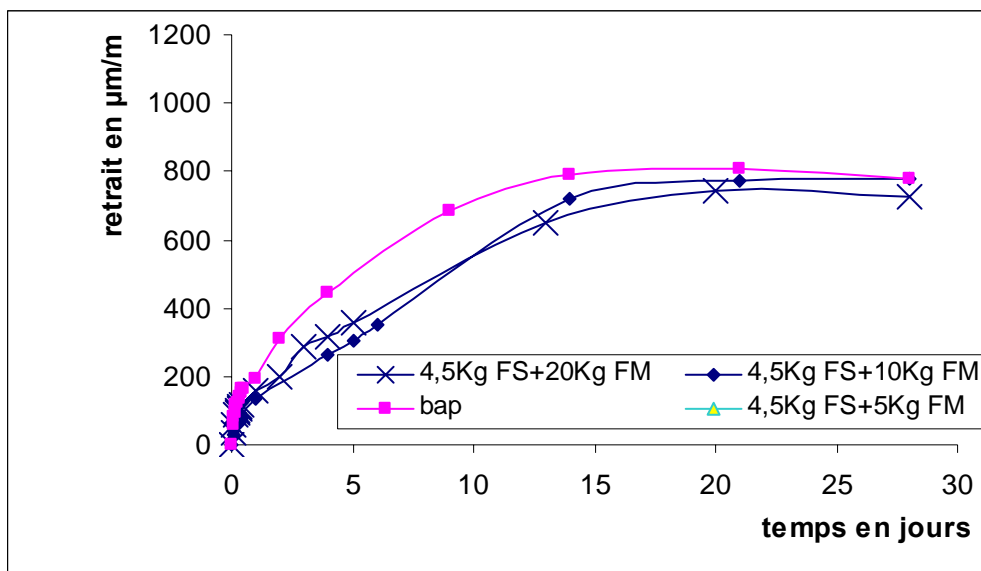
Les courbes de la figure V-5 illustrent les variations dimensionnelles (retrait total) des éprouvettes de bétons autoplaçants, laissées libres de tout échange avec le milieu ambiant.



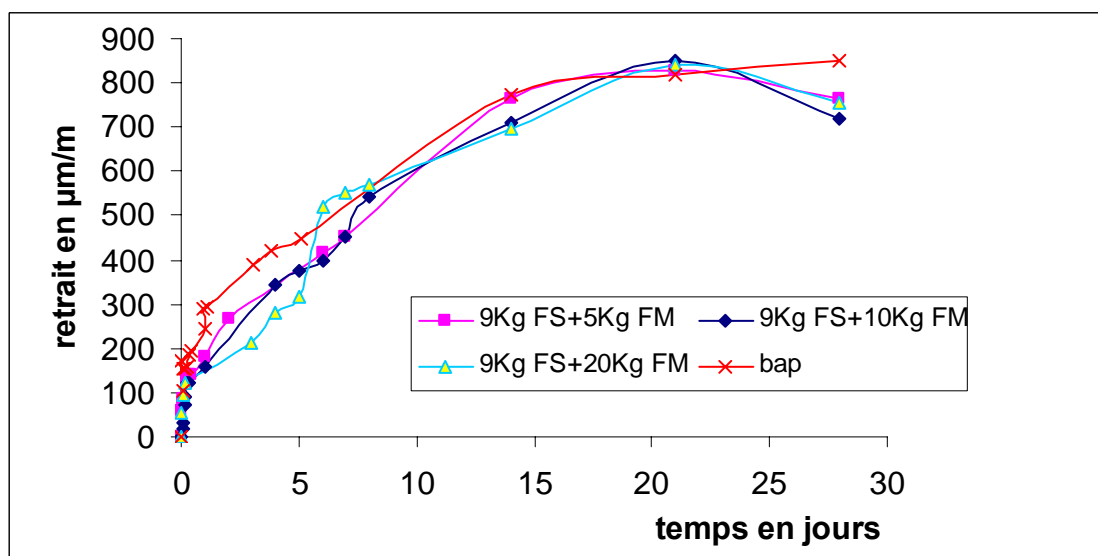
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V-5- : Variation du retrait pour différents dosages en fibres.

V-5 : Discussions des résultats :

L'évolution des retraits en fonction du dosage en fibres, est montrée dans les courbes de la figure V-5 (a, b, c, d) respectivement pour les fibres métalliques, fibres synthétiques et leurs formes hybrides. Le béton autoplaçant témoin est ainsi représenté sur toutes les figures. Il est tout à fait évident que ces courbes montrent que le retrait total augmente avec le temps. Cependant la majeure partie du retrait a eu lieu aux premiers jours de durcissement pour se stabiliser au bout d'un mois environ. Ce constat est valable pour tout les composites et mélanges hybrides retenus.

Au regard des courbes représentées sur ces figures, il apparaît que de manière générale le retrait diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en fibres [84]. Ce phénomène est apparent et beaucoup plus accentué pour les fibres synthétiques et leurs mélanges hybrides (courbes des figures a, c, et d). Les valeurs maximale de retrait total sont de l'ordre de $800\mu\text{m/m}$, ce qui représente déjà un gain, puisque les normes pour les bétons vibrés sont de l'ordre de $1100\mu\text{m/m}$ [84-85]. Les variations du retrait pour les différents dosages en fibres n'ont pas suivi une évolution dimensionnelle uniforme, et ceci est dû au dosage d'eau et de superplastifiant qui ont différé d'une composition à une autre.

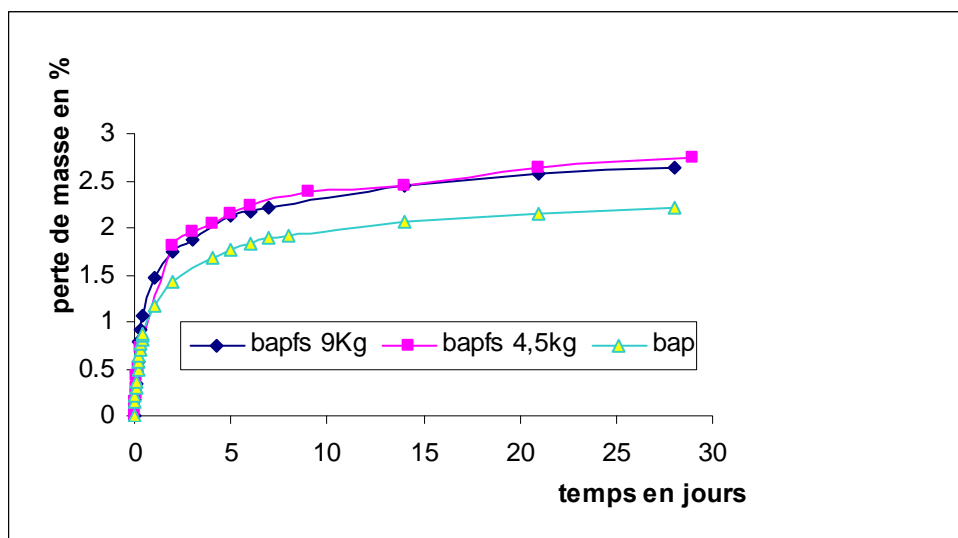
● Effet des teneurs en fibres :

Les courbes montrent l'évolution du retrait dans le temps en fonction de la teneur en fibres. Il est tout à fait clair que les fibres n'assurent non seulement pas un renforcement structural des bétons, mais peuvent se substituer au treillis anti-fissuration lorsque ce dernier est utilisé afin de limiter les risques de fissuration plastique.

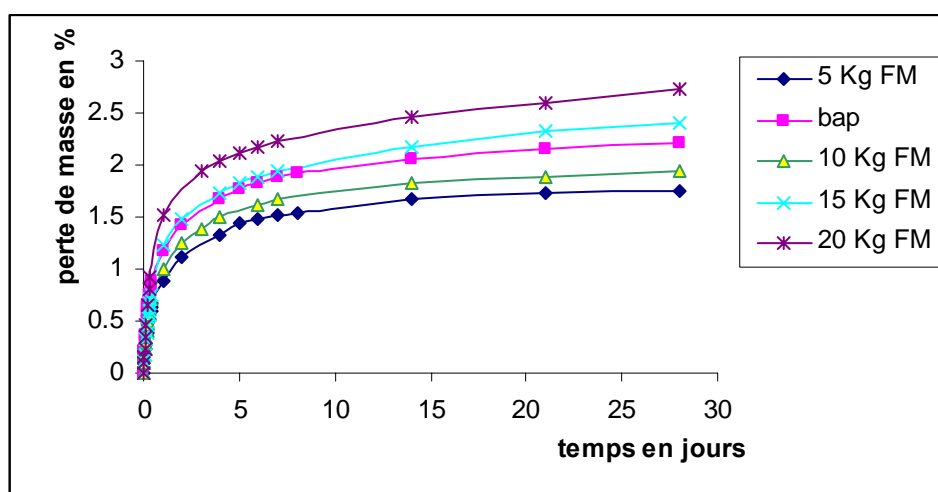
Pour empêcher que l'eau ne quitte le béton prématurément et ainsi limiter le retrait plastique, un renforcement en fibres synthétiques s'avère nécessaire. Les fibres, qu'elles soient métalliques ou synthétiques, sont régulièrement utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques [86]. En plus de contrôler la fissuration (jeune âge et retrait de séchage), les fibres d'acier augmentent la résistance et la ténacité du béton. Les fibres polypropylènes sont beaucoup utilisées pour contrôler la fissuration engendrée par le retrait plastique et augmenter la ductilité. Ces dernières peuvent avoir également un effet sur la fissuration due aux mouvements thermiques au jeune âge (comme le montre les courbes des figures V-5(a, b, c, d.)

V-6 : Variations pondérales : (perte de masse) :

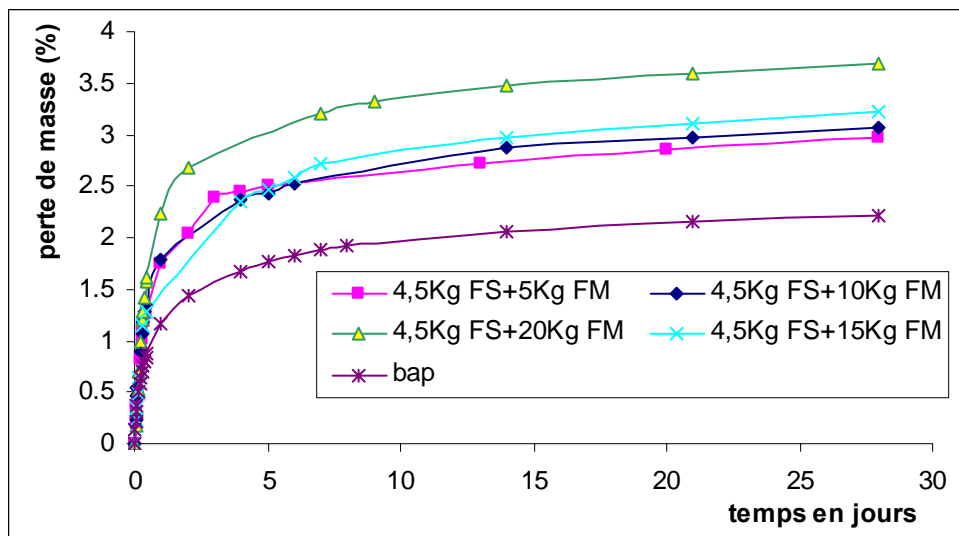
Le retrait ne serait déroulé sans qu'il y ait eu une perte d'eau et par conséquent une perte de masse. Les courbes des figures V-6, relatives à la perte de masse dans le temps pour les différents bétons mono et bi-fibrés étudiés, confirment bien l'existence du retrait dans les matériaux testés.



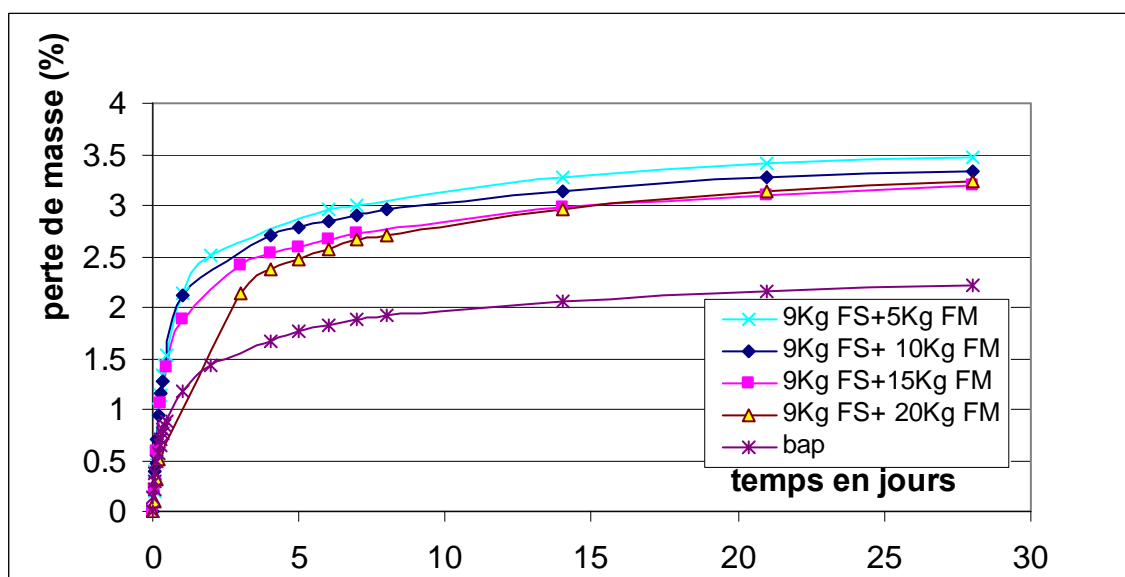
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure V-6 : Variation de la masse dans le temps pour les différentes compositions fibrées

La perte de masse est aussi importante comme dans le cas du retrait dans les premiers jours et devient par la suite presque constante. Sur ces courbes, nous constatons comme pour le cas du retrait l'influence du taux d'incorporation des fibres et leurs mélanges hybrides sur les pertes de masse. Nous constatons que pour les mélanges hybrides les pertes étaient plus accélérées et plus accentuées du fait que leurs compositions initiales a nécessité beaucoup d'eau. Les pertes de masse pour les mélanges hybrides ont atteint un taux de 3,5 % au bout de 28 jours, alors que pour les autres compositions les pertes sont de l'ordre de 2,5%.

V-7 : SENSIBILITE A LA FISSURATION DE RETRAIT EMPECHE :

Les résultats que nous avons déjà présentés permettent de conclure que les bétons autoplacants et les bétons autoplacants fibrés ont, d'une part, une capacité de déformation avant localisation de la macrofissuration plus importante et d'autres part, des déformations de retrait plus élevées. Il s'agit ici d'une compétition entre deux phénomènes dont les impacts sur la fissuration de retrait sont en opposition : la grande déformabilité étant un inhibiteur de la fissuration alors que les grandes déformations de retrait en est un élément moteur.

Pour évaluer la prépondérance de l'un sur l'autre, nous les avons mis en balance à travers un essai de retrait empêché (**ring-test**).

V-7-1 : Dispositif expérimental :

L'essai consiste à déterminer l'échéance et la nature de la fissuration d'une éprouvette annulaire coulée autour d'un cœur suffisamment rigide pour s'opposer à la déformation de retrait du matériau. Ainsi des contraintes de traction se développent dans le matériau qui se fissure si sa résistance en traction est atteinte. Pour les bétons autoplacant à fibrage mixte, il n'existe pas de norme pour un tel essai mais de simples recommandations (Grzybowski [84]) dont nous nous sommes inspirés.

Le dispositif que nous avons fait spécialement fabriquer pour cet essai, est illustré à la figure V-7-1. Le cœur est constitué d'un tube en acier de 20 cm de diamètre intérieur, 2.5 cm d'épaisseur et 14 cm de hauteur, autour duquel un anneau de 3.5 cm d'épaisseur, constitué par le matériau étudié est coulé. Pour une dessiccation uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette, cette dernière doit – être au moins égale à 4 fois son épaisseur. Le coffrage est

constitué de deux coquilles symétriques et démontables, et le tout repose sur une base en acier inoxydable.

Mise à part sa simplicité de conception, un anneau a l'avantage de présenter une symétrie facilitant le calcul des contraintes. Le tenseur des contraintes étant radial, la contrainte radiale σ_r est une contrainte de compression, nulle en R_0 .

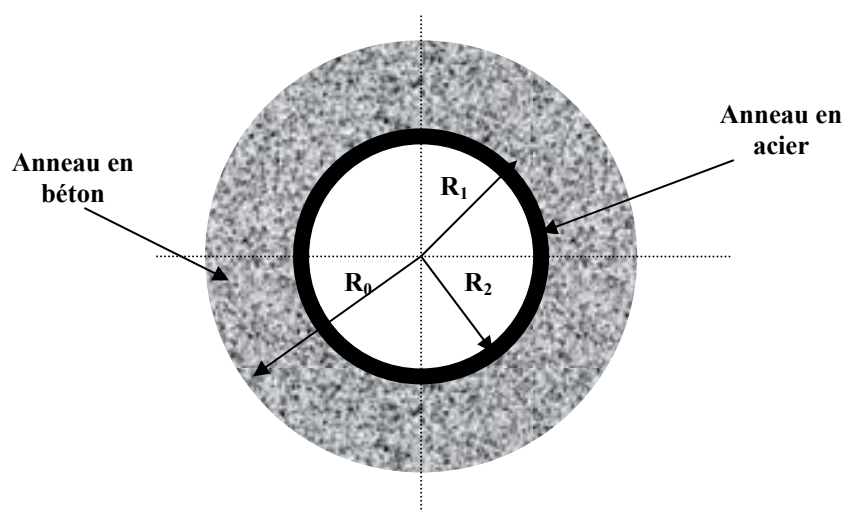


Figure V-7-1 : Dispositif de retrait empêché à l'anneau



Figure V-7-2 : Eprouvates dans la salle de retrait

Après le gâchage, les corps d'épreuves sont conservés pendant 24 heures dans une chambre à 20°C et à 100 % d'humidité. Une fois démoulés, ils sont conservés dans une salle climatisée, à une température de 21°C et 50 % d'humidité relative. La partie supérieure de l'anneau de béton est recouverte de graisse assurant ainsi un séchage uniquement radial, par la seule surface latérale de l'échantillon.

Trois moules ont été spécialement confectionnés et à chaque fois, une série de trois compositions différentes sont gâchées et suivies en même temps, évitant ainsi l'incidence des aléas climatiques toujours possibles dans la comparaison des résultats. Les éprouvates ont été conservées pendant 50 jours, âge à partir duquel aucune évolution de la fissuration n'a été observée.

Dans tout les cas, l'état de la surface latérale, même s'il n'est pas exempt de défaut permet de déceler à l'œil nu la fissuration. Pour améliorer la performance, en particulier pour mesurer l'ouverture des fissures et détecter le fond de chaque fissure (ouverture fine), nous avons fait appel au vidéo-microscope. Pour mémoire, il a été utilisé avec un grossissement de x 25 et avec possibilité d'acquisition d'images.

Nous avons procédé à deux séries d'essais récapitulées dans le tableau V-7-1. La première série a permis de confronter le béton autoplaçant de référence à un béton autoplaçant fibré, soit fibres métalliques ou fibres synthétiques. Cette série permet aussi de comparer les effets bien connus d'un renfort par différents types de fibres [85-86]. Dans la deuxième série, nous avons testé l'influence du fibrage mixte jusqu'à des dosages seuil.

	Compositions		
Série n°1	BAP	BAPFM4	BAPFS2
Série n°2	BAP	BAPFMS4	BAPFMS8

Tableau V-7-1 : Récapitulatif des 2 séries d’essais réalisées sous retrait empêché

Comme nous l’avons déjà signalé l’observation de la fissuration est d’abord faite à l’oeil nu puis affinée grâce au vidéo-microscope à un grossissement de x25. Dans tout les cas, les fissures observées prennent naissance sur le bord (supérieur ou inférieur) de l’anneau. Pour rendre compte de cette fissuration, chaque fissure est illustrée par des vues prises grâce au vidéo-camescope. Dans le cas d’une fissure traversante, trois vues sont présentées : une prise en partie supérieur du corps d’épreuve (à 3cm du bord supérieur), une deuxième à mi-hauteur et une troisième à 3 cm au dessus de la base.

Dans le cas d’une fissure qui ne traverse pas toute la hauteur de l’anneau, une, voire deux vues selon la longueur de la fissure sont présentées. Le cas échéant, nous proposons également une illustration du branchement de fissure. On le distinguera par un encadrement en trait pointillé de couleur.

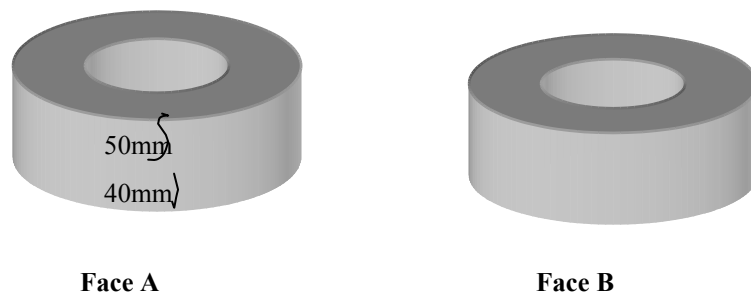
Dans tous les cas, nous avons représenté chaque anneau en décomposant sa surface latérale en deux vues (A et B) sur lesquelles nous avons reproduit fidèlement le réseau de fissures observées après 55 jours. Pour une fissure non traversante, nous avons quantifié l’emprise de chaque fissure par sa longueur projetée.

V-7-2 : Résultats et discussions :

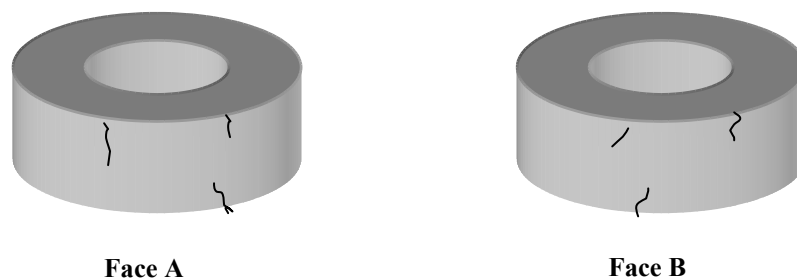
Les réseaux de fissures observées sont représentés sur les figures de V-7-3 à V-7-7. Ces photographies permettent de comparer l’efficacité du renfort par des fibres de différentes natures, avec leurs associations respectives. La fissuration observée sur le béton autoplaçant de référence est également donnée en illustration. Quantitativement, les résultats des observations parlent d’eux-mêmes et s’en passent de commentaires, du moins si on se limite à des considérations subjectives de l’état de fissuration comme critère de comparaison.



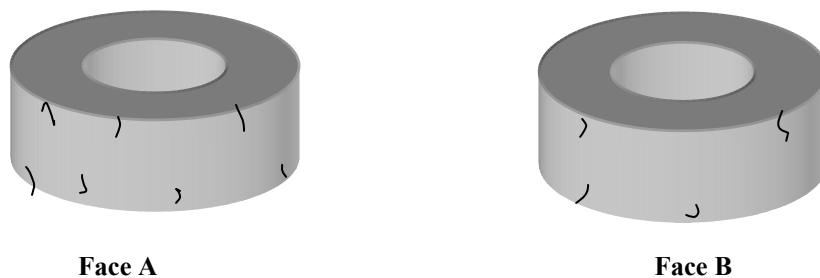
FigureV-7-3 : Représentation du réseau de fissures au 50^{ième} jour de l'essai de retrait empêché pour la composition pour la composition de référence (BAP).



FigureV-7-4 : Représentation du réseau de fissures au 50^{ième} jour de l'essai de retrait empêché pour la composition pour la composition BAPFM4



FigureV-7-5 : Représentation du réseau de fissures au 50^{ième} jour de l'essai de retrait empêché pour la composition pour la composition BAPFS2



FigureV-7-6 : Représentation du réseau de fissures au 50^{ième} jour de l'essai de retrait empêché pour la composition pour la composition BAPFMS4



FigureV-7-7 : Représentation du réseau de fissures au 50^{ième} jour de l'essai de retrait empêché pour la composition pour la composition BAPFMS8

Nous avons identifié quelques paramètres quantitatifs pouvant servir objectivement d'éléments de comparaison et nous les avons regroupés dans le tableau V-7-2 en reprenant les différentes séries d'essais que nous avons présentées précédemment.

Il s'agit :

- de l'âge A_f de l'amorce de la première fissure. En l'absence d'un dispositif automatique de détection d'un tel événement, nous nous sommes contentés de noter l'échéance, en jours à laquelle cette fissure a été mise en évidence.
- du nombre de fissures N_f après 55 jours d'essais.

- de la longueur projetée L_f (en mm) de la fissure principale après 55 jours d'essais.
- de l'ouverture maximale O_f (en mm) de la fissure principale après 55 jours d'essais.

Compositions	A_f	N_f après 55 jours	L_f maximale (mm) après 55 jours	O_f maximale (mm) après 55 jours
BAP	10	1	140	1,10
BAPFM4	17	2	110	0,22
BAPFS2	20	4	90	0,15
BAPFMS4	22	4	70	0,15
BAPFMS8	25	4	50	0,10

Tableau V-7-2 : Paramètres quantitatifs permettant de comparer l'état de fissuration

Compte tenu de la durée de chaque série d'essai (55 jours) et du nombre de moules limité à trois, c'est à chaque fois un résultat sur un essai qui est représenté. Néanmoins, on peut constater que l'ensemble des résultats permet de dégager des tendances qui ne laissent pas de places à l'ambiguïté.

● Initiation de la fissuration :

Les résultats issus de l'observation des anneaux béton soumis au retrait empêché montrent que l'incorporation des fibres retarde l'apparition de la fissuration. Le délai augmente en fonction du taux d'incorporation et le type des fibres. D'après la première série d'essais, le béton autoplaçant de référence se fissure dès le 10^{ième} jours, alors que pour les composites fibrés, la fissuration apparaît 17^{ième} jour pour 20 Kg/m³ de fibres métalliques, et le 20^{ième} jour pour 9Kg/m³ de fibres synthétiques. Autrement dit les fibres synthétiques sont plus efficaces concernant les variations dimensionnelles [87].

La série n°2 montre l'intérêt du fibrage mixte ou hybride sur les variations dimensionnelles. En leur présence, l'échéance de l'amorce de la première fissure est retardée et par conséquent il apparaît une synergie positive.

● Nombre de fissures, leurs longueurs et leurs ouvertures :

A priori, ces trois paramètres ne devraient pas être indépendants ; en effet, plus le nombre de fissures est élevé, plus fines sont leurs ouvertures et généralement plus courtes sont leurs longueurs. Si l'on considère les valeurs du Tableau V-7-2, série par série, les résultats obtenus sont globalement conformes à cette règle. Dans tous les cas, un taux d'incorporation de 9Kg/m³ de fibres synthétiques apparaît plus efficace que 20Kg/m³ de fibres métalliques. Néanmoins, leur association (BAPFMS8) est encore plus efficace, en terme de résistance à la fissuration de retrait. A choisir entre l'incorporation de fibres synthétiques et les fibres métalliques, dans la limite des dosages testés, on trouve toujours une meilleure solution avec l'incorporation des fibres synthétiques. On notera cependant que lorsque les deux sont associés, la synergie qui en découle peut atteindre la solution idéale (BAPFMS8). Par ailleurs, l'ouverture d'une fissure est un facteur qui influence très significativement la durabilité des matériaux cimentaires [88], dans le sens où elle constitue le lieu privilégié pour la pénétration d'agents agressifs.

V-7-3 CONCLUSION :

Comme nous l'avions prévu, les essais confirment que les déformations de retrait du composite cimentaire diminuent avec l'incorporation des fibres. Un renfort par des fibres permet d'atténuer cet effet mais ne l'annule pas totalement. Cette conclusion, valide aussi bien pour le matériau au jeune âge qu'à l'état durci.

Nous avons pu aussi démontrer l'intérêt du fibrage mixte quant à son efficacité au niveau des variations dimensionnelles : aussi bien en retrait libre qu'en retrait empêché.

S'agissant de la résistance à la fissuration de retrait, il apparaît clairement que le bénéfice dû à la grande déformabilité des bétons autoplaçants à l'état frais, est mis en compétition avec l'excédent de variations dimensionnelles de retrait. Nous avons réalisé des essais de fissurabilité par retrait empêché qui permettent de confronter les deux propriétés en opposition. Le résultat montre que la capacité de déformation avant localisation de la macrofissuration des bétons autoplaçants est prépondérante vis-à-vis de l'amplitude des variations dimensionnelles de retrait. La présence des fibres induit une multifissuration qui en conséquence génère des fissures plus courtes, moins ouvertes et donc moins préjudiciables notamment en terme de durabilité. Ainsi l'incorporation de fibres apparaît comme une solution prometteuse pour lutter contre la fissuration de retrait. Néanmoins, la synergie née de l'association de deux types de fibres s'est avérée être la meilleure solution puisqu'elle nous a permis d'empêcher toute forme de fissuration (BAPFMS8), là où pris indépendamment les mêmes taux d'incorporation de fibres séparément, n'ont réussi qu'à limiter la fissuration.

CHPITRE VI

CONCLUSIONS

GENERALES ET

PERSPECTIVES

POSSIBLES

Perpétuellement, de « nouveaux bétons » sont en cours de mise au point en Laboratoire et en cours d'agrément par les organismes de contrôle. Généralement, simultanément commence à apparaître quelques applications timides dans la profession titre expérimental.

Pour mener à bien cette recherche sur ces « nouveaux bétons », nous nous sommes intéressé à l'association de 02 types de « bétons innovants ». Le premier améliorant les qualités mécaniques, il s'agit du béton contenant des fibres et le second apportant des conditions de mise en œuvre facilitées et de nuisance sonores moins élevées, il s'agit des Bétons Autoplaçants.

En ce qui concerne les bétons fibrés on peut, en fonction de la géométrie et de la nature des fibres employées, scinder celles-ci en deux familles différentes. Les fibres adhérentes (métalliques : fonte amorphe) qui agissent dès les plus faibles ouvertures de fissures. Elles confèrent au matériau béton une résistance apparente en traction améliorée en agissant sur les micro-fissures. Les fibres glissantes qui vont être mise en tension plus progressivement, elles vont ponter les macro-fissures et diminuer la fragilité du matériau sans augmenter notablement sa résistance apparente en traction. Ces deux types de fibres ont donc des effets complémentaires.

Il est intéressant de pouvoir coupler ces deux effets en utilisant un mélange de ces deux types de fibres. L'étude bibliographique a montré que peu de travaux concluants avaient été menés dans ce domaine.

En l'absence de précautions nécessaires, ces apports positifs des fibres, mélangées ou non, peuvent être contrecarrés par un effet défavorable sur la maniabilité, et par suite, la compacité du mélange, notamment lorsque l'élancement des fibres est important. Le comportement rhéologique du mélange composite béton-fibres est donc un paramètre très important pour l'efficacité du résultat obtenu. On a vu dans la bibliographie que tous les problèmes de composition n'étaient pas encore résolus notamment vis-à-vis des qualités d'ouvrabilité des bétons fibrés.

En ce qui concerne les BAP le « projet national Bétons Autoplaçants » en cours, en abrégé PNB@P, fait avancer leur connaissance à grand pas mais montre qu'un des points

cruciaux est l'obtention de l'ouvrabilité désirée. La fluidification du mélange ne devant entraîner ni ségrégation ni ressuage. Dans le cadre du PNB@P, le cas des BAP fibrés n'est pas directement examiné.

La problématique que nous nous sommes posés, et qui a intéressé des industriels, est développée ci-après.

- Comment composer et réaliser un Béton Autoplaçant avec deux types de fibres afin que son comportement rhéologique soit optimisé et qu'il réponde à des critères de résistance minimum en traction et en compression ?
- Peut-on définir des critères d'ouvrabilité reliés à des paramètres rhéologiques quantifiables ?
- Comment faire la part de l'effet de chaque type de fibre afin de pouvoir estimer à l'avance le comportement d'un matériau bi-fibré en fonction des matériaux mono-fibrés correspondants ?

Examinons donc les réponses que nous avons essayé d'apporter à ces questions.

Le cahier des charges que nous nous étions fixés pour optimiser nos différents bétons mono-fibré, bi-fibré ou non fibré était :

- 35 à 40 MPa de résistance moyenne à la compression à 28 jours,
- et, dans le cas des BAP, au moins 600 mm d'étalement et une faible susceptibilité à la ségrégation.

Les tentatives de réalisation de tels bétons à partir de nombreux essais d'approche nous ont permis de mettre en évidence les paramètres de composition influant sur les propriétés des BAP fibrés à l'état frais. Les relations établies nous ont ainsi guidé dans l'optimisation des formulations.

Et en résumé on peut dire donc :

- Les fibres ont une contribution à l'écoulement du mélange voisine de celle des gravillons, par conséquent si l'on augmente la quantité des fibres, une diminution de celle des gravillons doit aller de pair.
- Selon leur nature, les fibres défavorisent plus ou moins l'aptitude à l'écoulement : Les fibres métalliques utilisées, notamment du fait de leur grande surface spécifique, ont été plus difficiles à répartir dans le mélange que les fibres synthétiques ; elles peuvent alors se disposer en amas qui ont un effet de freinage à l'étalement beaucoup plus défavorable que les plus gros gravillons. De ce point de vue l'effet des fibres synthétiques que nous avons testées a été moins néfaste. C'est pourquoi la teneur en granulats est plus faible lorsqu'on utilise des fibres métalliques.
- Pour une teneur donnée en fibres, les teneurs en superplastifiant et en filler gouvernent les propriétés d'homogénéité du mélange global. L'utilisation des bétons de fibres métalliques fait apparaître des blocages en écoulement confiné. La quantité de ce type de fibres devra donc déterminer celles du superplastifiant et de l'addition minérale.

Paradoxalement, on a constaté que les propriétés visqueuses diminuaient lorsque la surface des fibres augmentait (du fibrage synthétique en passant par le fibrage mixte, jusqu'au fibrage métallique). On peut donc en conclure que, au-delà de la quantité des fibres dans le mélange, la longueur des fibres joue un rôle primordial sur les propriétés d'écoulement : plus cette longueur est importante, malgré une surface offerte au béton plus faible, plus des enchevêtrements entre les fibres ou entre les fibres et des obstacles sont susceptibles de se créer et de ralentir l'écoulement. Ce ralentissement peut ne pas être visible quel que soit le sens de l'écoulement ; et cela dépend notamment de la souplesse de la fibre qui lui permettra de s'orienter plus ou moins aisément : La fibre synthétique entraîne un ralentissement à l'écoulement horizontal confiné alors qu'elle peut contribuer à l'accélérer, entraînée sans effort, en écoulement confiné vertical.

Par ailleurs, on constate que les fibres semblent conférer une plus grande cohésion au matériau lorsqu'il est au repos, alors qu'elles accentuent sa déstructuration lorsque ce matériau est en écoulement. Dès lors on peut imaginer que l'écoulement d'un BAP fibré peut rapidement devenir hétérogène avec séparation marquée des phases lorsque son état de déformation devient plus important.

Tout les bétons réalisés répondant aux critères basiques d'écoulement et de résistance de notre cahier de charges, nous avons approfondi l'étude de leur comportement mécanique en testant des mini poutres en flexion 03 points conformément à la norme européenne de Novembre 2005.

Ces essais, réalisés à vitesse de déformation imposée qui permettent de mettre en évidence la résistance à la traction en flexion de nos bétons, mais aussi et surtout le comportement post-pic de charge, qui nous révèlent les caractères de ductilité et de ténacité très importants pour nos bétons fibrés et par voie de conséquence mettre en évidence les contraintes résiduelles.

Nous avons ainsi testé des bétons mono-fibrés, fibres métalliques ou synthétiques, des bétons b—fibrés, métalliques et synthétiques. Comme référence, nous avons également testé un BAP non fibré.

On peut conclure de ces différents essais que les fibres métalliques adhérentes contribuent à l'augmentation du pic de résistance des bétons, mais par contre, cette association se montre plus fragile dans les situations des déformations imposées plus élevées. Ceci est dû à la rupture progressive des fibres métalliques qui ne peuvent suivre la déformation due à l'accroissement de l'ouverture de la macro-fissure.

Les fibres synthétiques ne sont pas efficaces pour l'augmentation du pic de résistance, par contre elles peuvent maintenir aux systèmes une résistance post pic lors de niveaux élevés de déformation. Dans ce cas le couplage allongement-glissement des fibres synthétiques est favorable au maintien d'une importante charge résiduelle après le pic de charge et augmente nettement l'énergie nécessaire à la rupture.

L'association des fibres métalliques adhérentes et synthétiques glissantes à des dosages seuils, constitue un compromis efficace de façon à augmenter la résistance en flexion des bétons et, à assurer une capacité post-pic significative.

Les BAP mono-fibrés semblent donner une adhérence à la matrice plus élevée que ce soit pour les fibres métalliques et celles synthétiques. Par contre, dans le cas des fibres mélangées, les différences semblent être moindres.

Sachant que, d'une part, les sollicitations de traction proviennent généralement d'efforts de flexion et que, d'autre part, ces essais de flexion sont bien plus simples à mener que des essais de traction pure, nous pouvons voir tout l'intérêt des résultats précédemment détaillés.

Et enfin les problèmes de variations dimensionnelles (retrait libre et retrait empêché à l'anneau), ainsi que pondérales (perte de masse) ont été étudiés en détail pour différentes compositions.

Les perspectives de la recherche, après ces premiers travaux sur les Bétons Autoplaçants bi-fibrés sont nombreuses :

- Premièrement, il faudrait affiner les règles de composition de ces nouveaux bétons en fonction de la nature des fibres employées et de leurs pourcentages respectifs.
- Deuxièmement, afin que les problèmes d'ouvrabilité soient scientifiquement résolus, il faudrait utiliser différentes géométries de cisaillement au rhéomètre pour chaque composition fibrée, tenant compte notamment de la nature et de la géométrie des fibres.
- Enfin, si nous nous sommes intéressés au comportement mécanique instantané de nos bétons fibrés, nous n'avons pas examiné le facteur temps qui sur des matériaux synthétiques et sans parler de durabilité chimique, peut-être, très influent. En effet, par exemple, on peut se poser la question du comportement en fluage en flexion ou en traction qui pourrait amener, à terme de très grandes déformations ou une rupture par chute de la résistance résiduelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **OZAWA K ; KUNISHIMA M ; MAEKAWA K ;OKAMURA H.** « Challenge for high performance concrete ».Proc.Conf. On high performance concrete, University of Tokyo, p 5-17 Sep 1991.
- [2] **MIURA N. ; TAKKDA N. ; CHIKAMATSU R., SOGO S.** « Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions » ACI SP 140.'High performance concrete in severe environments'', detroit, p. 163-186. 1993.
- [3] **UMEHARA, H ; and JIRSA,J.O.,** « Shear strength and deterioration of short Reinforced concrete columns under cyclic deformations » PMFSEL Report N° 82-3, Dpt of civil engineering, University of texas at austin, Austin texas, July 1982, 256 pages.
- [4] **AFGC.** Association Francaise de Genie-Civil : « Bétons Autoplaçants, recommandations provisoires ». Paris 2000.
- [5] **SEDRAN T.** « Les bétons autonivelants- Synthèse bibliographique », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 196, p53-60 Mars-Avril 1995.
- [6] **KHAYAT K.H.** « use of viscosity –modifying admixture to reduce top-bar effect of anchored bars cast with fluid concrete », ACI Material journal, Vol 65 N°2, Mars-Avril 1998.
- [7] **OKAMURA H., OZAWA K.,** « slf-compactable high performance concrete in Japan », International workshop on high performance concrete, Bangkok, Thaïlande, 16p, Nov 1994.
- [8] **DE LARRARD F. et al,** « prévision de la compacité des mélanges granulaires le modèle de suspension solide n°1- fondements théoriques et calibration du modèle »,Bulletin du laboratoire central des ponts et chaussées n° 194, Nov-Dec 1994.
- [9] **OZAWA K., MAEKAWA K., OKAMURA H.** « the high performance concrete with high filling capacity ».Proceeding of the international symposiumon admixtures for concrete, held by RILEM, Barcelone, p 51-62 1990.
- [10] **OKAMURA H., OZAWA K.** « Mix design for self-compacting concrete. » concrete librairy of JSCE, n°25 june 1995.
- [11] **OH S.G., NOGUCHI T., TOMASAWA F.** « Toward mix design for rheology of self-compacting concrete », Proc of the first RILEM syposium on self-compacting concrete, Stockholm, 13-15 Sept 1999.
- [12] **PAULTRE, KHAYAT, LANGLOIS, TRUDEL, CUSSON** « Structural performance of some special concrete », Fourth international syposium on the utilization of high strengh / high performance concrete. P 787-796 Mai 1996.
- [13] **GIBBS J.C, ZHU W.** « strength of hardened of self- compacting concrete ». Proc. Of the first RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, 13-15 Sept 1999.

[14] **COCHET G., SORRENTINO F.** « Limestone filled cements : properties and uses », Progress in cement and concrete, vol 4 p 266-295 1991.

[15] **SONEBI M., BARTOS P.J.M** « Hardened SCC and its bond with reinforcement » Proc. Of the first RILEM symposium on self-compacting concrete, Stockholm, 13-15 Sept 1999.

[16] **HU C., BARBBIERI B.**, « comparaison des retraits des BAN et d'un béton fluide traditionnel », sciences de matériaux et propriétés des bétons , 1ere rencontre internationale, p265-272 1998.

[17] **AMBOISE J., PERA J., ROLS S.** « Les bétons autonivelants », Annales du bâtiment et des travaux publics. N°1 Jan 1997.

[18] **KHAYAT K.H, GUIZANI Z.** « use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete », ACI Journal, Vol.94 N° 4, July-August 1997.

[19] **SOYLEV T.A, FRANCOIS R.** « défauts d'adhérence acier-béton dus au ressuage et au tassement du béton frais », annales du bâtiment et des travaux publics,n°6 P 25-34 Dec 2001.

[20] **SONEBI M., BARTOS P.J.M.** « Flexural response and performance of reinforced beams cast with self-compacting concrete », Proceedings of the second symposium on self-compacting concrete. P 517-526 Tokyo Oct 2001.

[21] **OGAWA, SAKATA, TANAKA**, « A study on reducing shrinkage of high flowable concrete », second international symposium of CANMET/ACI, Las Vegas P 55-72 –1995.

[22] **ROL S., AMBOISE J., PERA J.**, « Developement of an admixtures for self-leveling concrete », 5th CANMETIACI, Int. Conf. On superplasticizer et other chemical admixture in concrete. P 493-509 Rome Oct 1997.

[23] **HAYAKAWA, MASTUOKA, SHINDOH**, « Developement and application of superworkable concrete », RILEM workshop special concrete : workability and mixing , p.Bartos Ed, p25-51 1993.

[24] **KUROIWA, MASTUOKA, SHINDOH, HAYAKAWA**, « Application of superworkable concrete to construction of a 20 story building » Int Symposium on high performance concrete in science environments,SP 140,ACI, Detroit, P147-161 1993.

[25] **TANGTERMSIRIKUL S., VAN B.K.** « Blocking criteria for agregate phase of self-compacting high performance concrete », Proc. Of regional symposium on infrastructures developement in civil engineering, SC4, P 58-69, 19-20 Dec 1995.

[26] **ROSSI P.** « Les bétons de fibres métalliques » Ponts et Chaussées, 309P. Paris 1998.

[27] **PEIFFER G.** « Les composites à matrice cimentaire renforcés de fibres FIBRAFLEX » Documentation du Centre de Recherche de Pont à Mousson. 1991.

[28] **PEIFFER G.** « Mechanical effectivness ribbon-shaped fibers when used in fibers reinforced concrete ». Centre de Recherche de Pont à Mousson. 1991.

- [29] **BENTUR A., MINDESS S.** « Fibers reinforced cementous composites » N°2, Vol3 P440-449 ELSEVIER 1990.
- [30] **BASCOUL A., TOUMI A., FANUTZA K.**, « Steel Micro Fibers Reinforced High Strength Concrete: Role of concrete in sustainable development » Int. Symposium DUNDEE, 2003. Tomas Telford publishing.
- [31] **CASANOVA P.** « Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure » Thèse de doctorat de l'ENPC 203p- Soutenue le 06/12/1996.
- [32] **KAWAMATA A., MIHASHI H., FUKUYAMA H.** « Properties of Hybrid Fibers Reinforced Cement- Based Composites. » Journal of advanced concrete technology, N°1, Vol 3 P 283-290 Japan 2003.
- [33] **MARKOVIC I., WALRAVEN J.**, « Self-Compacting Hybrid Fiber Concrete Mix design : Workability and Mechanical properties. » Third International Symposium on Self-Compacting Concrete pp. 763-775 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [34] **FIGUEREDO A.D** « Fibers Reinforced Concrete » Rapport BT/PCC/260 EPUSP-PCC, 66p Sao Paulo –Bresil 2003.
- [35] **HOUARI H., DEBICKI P., CLASTRES P.** « Behaviour of concrete reinforced with metal fibers, under cyclic loading » The second International Symposium : Textiles Composites In Building Construction : Lyon (France)1992.
- [36] **VIERA M., BITENCOURT A.**, « Deformability of hardened self-compacting concrete » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 637-644 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [37] **ASSIE S., ESCADEILLAS G., MARCHESE G.**, « Durability of Self-Compacting Concrete » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 655-670 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [38] **PROUST E., PONS G., ASSIE S.**, « Creep and shrinkage of self-compacting concrete » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 645-654 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [39] **VITEK J.L.**, « Long term deformation of self-compacting concrete » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 663-671 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [40] **CHOPIN D., FRANCY O., LEBOURGEOIS S., ROUGEAU P.**, « Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 672-683 Reykjavik (Pologne) 2003.
- [41] **BAÜML M.F, WITTMANN F.H.**, « Improved durability of self-compacting concrete by addition of fibers » 2nd International Symposium on self-compacting concrete. PP 527-536 Tokyo 2001.

[42] **JOHANSEN K. HAMMER T.A.** « Drying shrinkage of Norwegian self-compacting concrete » Site Internet : NORDIC CONCRETE RESEARCH : 2003.

[43] **HEIRMA G., VANDEWALLE L.** « The Influence of Fillers on the Properties of Self-Compacting Concrete in Fresh and Hardened State » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 606-618 Reykjavic (Pologne) 2003.

[44] **KLUG I., HOLCHMACHER K.**, « Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete, rheological measurements on fiber reinforced self-compacting concrete. » International Symposium on Self-Compacting Concrete. PP 596-605 Reykjavic (Pologne) 2003.

[45] **PONS G.** « Synthèse des travaux récents sur le comportement mécanique instantané et différé des BAP » Projet National, 6p, 2003.

[46] **GROTH P., NEMEGER D.**, « The use of steel fibers in self-compacting concrete. » 1st RILEM International symposium of self-compacting concrete. Pp 497-507 Stockholm 1999.

[47] **CEBTP.** « Formulation des Bétons autoplaçants : Synthèse bibliographique, Rapport n° 004/98 006 pp 1-15. 1998.

[48] **KHAYAT K.H., ROUSSEL Y.**, « Testing and performance of fiber-reinforced self-compacting concrete. » 1st RILEM International symposium of self-compacting concrete. Pp 509-521 Stockholm 1999.

[49] **GRUNWALD S., WALRAVEN J.**, « Maximum content of steel fibers in self-compacting. » 2nd International Symposium on self-compacting concrete. PP 127-136 Tokyo 2001.

[50] **GRUNWALD S., WALRAVEN J.** « Rheological study on the workability on fiber-reinforced mortar. » 2nd International Symposium on self-compacting concrete. PP 137-146 Tokyo 2001.

[51] **GRUNWALD S., WALRAVEN J.** « Rheological measurements on self-compacting fiber reinforced concrete. » 3rd International symposium on self-compacting concrete. Pp 48-58, Reykjavik (pologne) 2003.

[52] **GRUNWALD S., WALRAVEN J., OBLADEN B., ZEGWAARD J.W.**, « Tunnel segments of self-compacting steel fiber reinforced concrete. » 3rd International symposium on self-compacting concrete. Pp 715-724, Reykjavik (pologne) 2003.

[53] **ALCANTARA M.**, « Bétons autoplaçants à fibrage mixte : rhéologie et comportement mécanique » Thèse de doctorat –LMDC-INSA- Toulouse soutenue le Sept 2004.

[54] **KACI S., BOURAS R.**, « Influence de la concentration et de l'élancement des fibres métalliques sur le comportement rhéologique (viscosité plastique, seuil de cisaillement) des bétons fibrés à l'état frais : Approche théorique et expérimentale. Groupe Français de Rhéologie, version 029pdf ; 8 pages, 2003.

[55] **BARON J., OLLIVIER J.P.**, « Les bétons, Bases et données pour leurs formulations. » Eyrolles, 1996.

[56] **KHAYAT K.H., GHEZAL A., HADRICHE M.S.**, « Utility of statistical models in proportioning self-compacting concrete. » In proceeding of the 1st International RILEM symposium of self-compacting concrete ; RILEM 1999.

[57] **ROSSI P. ; ULM F.J et BELLOC A.**, « Les bétons à Ultra-Hautes performances fibrés » Bulletin de liaison des LPC n° 196 pp 61-66 1995.

[58] **Norme europeene NF EN 14651** « Méthode d'essai du béton de fibres métalliques » Novembre 2005.

[59] **Recommandations RILEM cpc 8**, « Modulus of elasticity of concrete in compression », Materials and Structures ; vol6, n° 30, Nov-Dec 1972, pp 404-406.

[60] **VAYSBURG A.M, BISSONETTE B, BROWN C.D** « Durability of concrete repair : field analysis versus laboratory results » in proc. Industrial floors'03, technische academy esslingen, editor : p.seidler,2003 pp 103-113.

[61] **PIERRE P, PLEAU R, PIGEON M** ; « Propriétés constructives des pâtes de ciment armées de microfibres d'acier » Compte rendu du troisième colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques 11-12 juin 1998 pp 175-184-France.

[62] **SAUCIER F, MAILHOT T, et PIGEON M** : « Reflexion sur la capacité de 'survie après fissuration' du béton armé de fibres soumis à une sollicitation de fatigue en flexion » Compte rendu du 2eme colloque Francophone sur les bétons renforcés de fibres pp 97-106 Toulouse-France 1996.

[63] **CASANOVA P.** « Les bétons renforcés de fibres métallique multi-échelle ». Thèse de l'ENPC 1995.

[64] **ROSSI P, LE MAOU F** ; « Etude expérimentale sur l'effet du seuil relatif au pourcentage des fibres incorporés dans un BFM » note interne au LCPC , non publié, 1993.

[65] **CHANVILLARD G**, « Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire » Etudes et recherches des LPC, série ouvrages d'art, OA 12, 1993.

[66] **MERCIER P**, « Etude de l'influence d'un traitement de phosphatation sur la résistance à l'arrachement des fibres métalliques » mémoire de maîtrise , Dpt de génie-civil Université Laval , Québec –Canada.

[67] **Recommandations RILEM**, « Determination of the fracture energy of mortar and concrete by beams of three point bend tests on notched beams », Materials and Structures, Vol 18, n° 106, pp 285-290 1985.

- [68] **Parviz SOROUSHIAN, Hafez EL YAMANY**, « Mixed-mode fracture properties of concrete Reinforced with low volume fraction of steel and polypropylene fibers » *Ciment and concrete composites* 20 (1998) 67-78.
- [69] **Wu Yao, Jie Li, Kew Wu**, « Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction » *ciment and concrete research* 33 (2003) 27-30
- [70] **AİTCIN P.C, A.Neville, and Acker.A** « Les différents types de retrait du béton » *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* n° 213, pp 41-51, Mai-Juin 1998.
- [71] **LOUKILI** « Etude du retrait et du fluage des bétons à Ultra-Hautes Performances ». Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, 1996.
- [72] **ZHOU F.P, LYDON, F.D** « Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates » *Cement and concrete research*, vol 25 pp 543-552, 1995.
- [73] **Neville. A** « Propriétés des bétons (version française). Eyrolles, 2000.
- [74] **BISSONNETTE. B, Pierre. P, Pigeon.M** « Influence of key parameters on drying shrinkage of cimentitious materials » *Ciment and concrete research*, n° 29 pp 1655-1662, 1999.
- [75] **Haidar. K** « Modélisation, de l'endommagement des structures en béton – Approches numériques et effet de la microstructure sur les propriétés de rupture » Thèse de l'école centrale de Nantes, 2002.
- [76] **DE LARRARD. F** « Structure granulaire et formulation des bétons » Rapport interne LCPC, 2000.
- [77] **PIJAUDIER.G, BAZANT Z.P.** "Cracks interacting with particles or fibers in composite materials." *ASCE journal of engineering mechanics*, 117(7) pp 1611-1630, 1991
- [78] **ATIS C.D, KILIK A, SEVIM U.K** "Strength and shrinkage properties of mortar containing a nonstandard high-calcium fly ash" *cement and concrete research* n° 51 pp 121-131 juin 2003.
- [79] **UCHIKAWA.S, HANCHARA.S, HIRAO.H** "Influence of microstructure on the physical properties of concrete prepared by substituting mineral powder for part of fine aggregate" *Cement and concrete research*, 26(1) pp 101-111, 1995.
- [80] **BUI V.K, MONTGOMERY D** "Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone" In proceeding of the first international RILEM Symposium of self-compacting concrete. RILEM, 1990.
- [81] **HEIMAN G, VANDEWALLE.L**, "The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state." In proceeding of the third international RILEM Symposium of self-compacting concrete. RILEM, 2003.

[82] DECROIX F, COLOMBET P, PERA J, AMBROISE J, « Réduction de l'effet de curling des dalles et chapes réalisées en mortier autonivellant. » Forum des associations AFGC, AUGC, IREX, 30 et 31 mai 2002 Toulouse, 2002.

[83] M. SARKIS « Contribution à l'étude de la durabilité des dallages et des pistes aéroportuaires en béton ». Thèse de l'Université Paul Sabatier 2002.

[84] N. Banthia and R.Gupta « Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC) : fiber synergy in high strength matrices » Materials and structures / Matériaux et constructions, vol.37, December 2004, pp 707-716

[85] Mustapha Sahmaran, I. Ozgur Yaman “Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete” Building and environment vol 40 2005 pp 1672-1677.

[86] Mustapha Sahmaran, I. Ozgur Yaman “ Hybrid fiber reinforced self-compacting with a high-volume coarse fly ash ” Construction and Building Materials (2005) article in press.

[87] Steffen Grünewld, Joost C. Walraven “ 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 (2001) pp 1793-1798.

[88] V. Corinaldesi, G.Moriconi “Durable fiber reinforced self-compacting concrete” Cement and Concrete Research vol 34 (2004) pp 249-254.