

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ MENTOURI-CONSTANTINE
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Civil

N° Ordre :

N° Série :

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT D'ÉTAT

Spécialité : Matériaux

Par

Mme BENTALHA née MALOU MALIKA

Intitulé :

**Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le
Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire.
Caractérisation - Comportement monotone - Microstructure**

Directeur de thèse : Professeur HOUARI Hacène

U. M. C

Devant la commission d'examen composée de :

Président	Mme F. Z MIMOUNE	Professeur	U. Mentouri-Constantine
Examineur	Mr M. F HABITA	Professeur	U. Badji Mokhtar-Annaba
Examineur	Mr M. BELACHIA	Professeur	U. Skikda
Examineur	Mr A. BENOUIS	M. C.	C. U. Guelma

Soutenue le 30 OCTOBRE 2007

Remerciements

Ils vont directement à toutes les personnes qui ont croisé mon parcours de chercheur et qui m'ont offert leur aide, leur soutien quand j'en ai eu besoin. Il est important de dire que mon travail de recherche m'a permis de faire des rencontres qui si elles m'ont permis d'avancer et de finir, me permettent de dire que l'aventure sur le plan humain a été aussi, sinon plus importante que celle sur le plan scientifique.

En Algérie, il existe des organismes, des entreprises qui se mettent au service de l'universitaire, il n'y a qu'à demander, parce que pour eux, il est très important que l'on avance ensemble. Je citerai le CTC Est, le LTP Est, le CMT KHROUB. Je ne remercierai jamais assez tous les techniciens qui m'ont offert leur savoir faire, je leur adresse toute ma sympathie.

En France, des laboratoires n'hésitent pas à nous recevoir et deviennent partie prenante de la recherche effectuée, je citerai pour cela le laboratoire LEEVAM de Neuville université et le laboratoire matériaux d'Amiens. Messieurs le Docteur KADRI et le Professeur BEJI ont collaboré sur le plan scientifique et m'ont permis de solutionner bons nombres de problèmes.

Faire de la recherche est une aventure passionnante, pour toutes les difficultés que cela représente, c'est pour cela que je voudrai exprimer toute ma reconnaissance à celui qui m'a beaucoup aidé et m'a permis de vivre cette expérience, mon directeur de thèse ; HOUARI HACENE.

Je voudrai exprimer ma gratitude pour toute l'aide apportée avec le sourire, envers Monsieur BENSEBTI Salah et Monsieur OUAHAB Hichem sans qui la phase expérimentale n'aurai jamais débutée.

Je terminerai en disant que si l'on se retrouve seul devant le jury, c'est que derrière soi une famille, des amis nous servent de soutien et il est très agréable de leur offrir ce travail en guise de reconnaissance. Je voudrai avoir une pensée très spéciale vers la personne qui m'a accompagnée et aidée tout au long de cette recherche.

Remerciements

Je voudrai faire des remerciements particuliers à :

Mme **MIMOUNE**

pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury

Messieurs **HABITA, BELACHIA, BENOUIS**

de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner et de critiquer mon travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	01
 CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
1. Généralités.....	05
2. Composition des bétons de fibres.....	06
2.1 Présentation du matériau béton.....	07
2.2 Nature des fibres.....	09
2.3 Effet de l'orientation et de la distribution des fibres.....	11
3. Formulation des bétons de fibres.....	12
4. Propriétés mécaniques.....	17
4.1 Résistance à la compression.....	17
4.2 Résistance à la traction directe.....	17
4.3 Résistance à la flexion.....	18
4.4 Résistance à la fatigue.....	18
5. Fissuration du béton et actions mécaniques.....	19
5.1 Diverses causes et périodes d'apparition des fissures.....	19
5.2 Distinction entre fissuration sous charges ou sous déformations imposées.....	20
5.3 Durabilité des bétons renforcés de fibres métalliques.....	20
5.3.1 Cas n°1.....	21
5.3.2 Cas n°2.....	23
6. Fluage	24
6.1 Sollicitation de flexion.....	26
6.2 Le mécanisme de fluage.....	26
6.2.1. Les déformations du fluage sous contraintes croissantes.....	28
6.2.2 Définition de la fonction de fluage.....	32
6.2.3 Comparaison fluage en traction / fluage en compression.....	32
6.2.4 Influence du type de chargement.....	34
6.2.5 Influence de l'eau.....	34
6.2.6 Influence du rapport E/C.....	35
6.2.7 Influence des granulats.....	36
6.2.8 Influence des ajouts.....	36

6.3 Etude de l'influence des fibres métalliques sur le retrait du béton.....	36
7. Conclusion.....	37
Références.....	39

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS

1. Introduction.....	45
1.1 Pourquoi les essais à 7 jours ?.....	46
1.2 Propriétés mécaniques du matériau.....	47
1.3 Pourcentage des fibres.....	47
2. Constituants des bétons étudiés.....	48
2.1 Fibres.....	48
2.1.1 Fibres industrielles.....	49
2.1.2 Sous produits industriels.....	50
2.2 Ciment.....	52
2.3 Sable.....	53
2.4 Eau.....	56
2.5 Fluidifiant.....	57
3. Techniques expérimentales.....	58
3.1 Mise en œuvre.....	58
3.1.1 Malaxage.....	58
3.1.2 Coulage et vibration.....	59
3.1.3 Détermination de la maniabilité.....	59
3.1.4 Mesure d'air occlus.....	60
3.1.5 Densité.....	61
3.2 Mode de conservation.....	61
3.3 Résistance en compression.....	61
3.4 Résistance en traction par flexion	62
4. Formulation.....	63
5. Composition.....	65
6. Programme expérimental.....	65
7. Résultats et discussions.....	67
7.1 Analyse des différents mélanges à l'état frais.....	67
7.2 Analyse des différents mélanges à l'état durci.....	70

7.2.1 Résistance à la compression.....	70
7.2.2 Résistance à la traction.....	72
8. Conclusion.....	74
Références.....	75

CHAPITRE III : COMPORTEMENT MONOTONE

1. Introduction.....	77
2. Rappel des mélanges utilisés et des caractéristiques.....	78
3. Programme expérimental.....	79
4. Corps d'épreuve et mode opératoire des essais.....	79
5. Etude statique sous sollicitations monotones de flexion.....	79
5.1 Courbes charges – flèches.....	80
5.2 Diagrammes charges – flèches.....	82
5.3 Modules d'élasticité.....	88
5.4 Indices de ténacité.....	89
6. Conclusion.....	90
Références.....	92

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT DIFFERE

1. Introduction	93
2. Présentation du dispositif d'essai : bâti de fluage en flexion 4 points.....	93
3. Matériaux.....	100
3.1. Renforts.....	100
3.2 Matrice.....	100
4. Paramètres d'influence.....	101
4.1 Paramètres d'essais.....	101
4.1.1 Paramètres importants : éléments représentatifs.....	101
4.1.2. Vitesse de déformation et température.....	102
4.1.3. Direction de sollicitation.....	102
4.2 Flexion.....	103
5. Caractéristiques des poutrelles testées.....	104
5.1 Caractérisation et normalisation des mélanges retenus.....	105
5.2 Comportement sous sollicitation de chargement monotone croissant.....	105

5.3. Programme expérimental.....	105
6. Résultats des essais de fluage	105
6.1 Généralités.....	105
6.2 Paramètres d'influence sur les déformations.....	106
6.3 Influence des différents facteurs sur les réponses du fluage.....	106
6.3.1 Influence du taux de chargement.....	106
6.3.1.1 Sur la déformation instantanée.....	106
6.3.1.2 Sur le fluage propre.....	109
6.3.1.3 Sur le fluage total.....	112
6.3.2 Influence de la charge maintenue constante.....	114
6.3.2.1 Sur la déformation instantanée.....	114
6.3.2.2 Sur le fluage propre.....	115
6.3.2.3 Sur le fluage total.....	117
6.3.3 Influence de l'élançement de la fibre	118
6.3.3.1 Sur la déformation instantanée.....	118
6.3.3.2 Sur le fluage propre.....	119
6.3.3.3 Sur le fluage total.....	120
6.3.4 Influence du mode de chargement (croissant).....	122
6.3.4.1 Sur la déformation instantanée.....	122
6.3.4.2 Sur le fluage propre.....	123
6.3.4.3 Sur le fluage total.....	123
6.3.5 Influence de l'introduction des fibres.....	124
6.3.5.1 Sur la déformation instantanée.....	124
6.3.5.2 Sur le fluage propre.....	125
6.3.5.3 Sur le fluage total.....	129
7. Discussions.....	134
8. Microstructure.....	135
8.1 Introduction.....	135
8.2 BSF.....	136
8.3 BFI50.....	137
8.4 BSP50.....	139
8.5 BSP25.....	140
9. Synthèse.....	141

10. Conclusion.....	142
Références.....	144
CONCLUSION GENERALE.....	146
ANNEXES.....	150

LISTES

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

TABLEAUX	
Tableau 1. Différents types de fibres.	09
Tableau 2. Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées	10
Tableau 3. Définition de la formulation	13
Tableau 4. Paramètres influant sur le fluage d'un élément de structure en béton	27
PHOTOS	
Photo 1. Moule 7x7x28 cm	15
Photo 2. Moule 16x32 cm	16
FIGURES	
Figure 1. Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BRFM.	17
Figure 2. Mécanisme de corrosion des fibres en présence de fissure, et sans pénétration des chlorures.	24
Figure 3. Essai de compression sur une éprouvette cylindrique en béton.	28
Figure 4. (a) Test mécanique de fluage.	30
Figure 4. (b). Déformations de fluage primaire et secondaire.	30
Figure 5. (a) Evolution de la déformation de fluage complète	32
Figure 5. (b) Variation du coefficient de fluage $\phi(t, t')$ en fonction du niveau de contrainte.	32
Figure 6. Fluage spécifique $C(t, t')$ en traction et compression.	34
Figure 7. Déformations de fluage en traction et compression à différents âges.	35

CHAPITRE II : METHODOLOGIE DES ESSAIS

TABLEAUX	
Tableau 1. Fibres normalisées	51
Tableau 2. Fibres recyclées	52
Tableau 3. Composition chimique du clinker	54
Tableau 4. Composition minéralogique du clinker (NF EN 196-2)	54

Tableau 5. Propriétés physiques du ciment	55
Tableau 6. Résistances mécaniques du ciment (MPa)	55
Tableau 7. Caractéristiques géométriques du sable	56
Tableau 8. Caractéristiques physiques	57
Tableau 9. Caractéristiques mécaniques	57
Tableau 10. Caractéristiques chimiques	57
Tableau 11. Composition chimique de l'eau	58
Tableau 12 : Fiche technique du fluidifiant	59
Tableau 13 : composition du béton utilisé (pour 1 m ³)	67
Tableau 14. Essais de caractérisation sur bétons frais.	68
Tableau 15. Essais de caractérisation sur bétons durcis	68
Tableau 16. Essais à la compression .Eprouvettes 16x32 cm	72
Tableau 17. Essais à la traction. Eprouvettes 7x7x28 cm	74
PHOTOS	
Photo 1 : fibres industrielles FI50 (élanement 83.33)	51
Photo 2 : copeau industriel SP50 (élanement 83.33)	53
Photo 3: copeau industriel SP25 (élanement 41.66)	53
Photo 4. Maniabilimètre	62
Photo 5. Eprouvettes 16x32 cm	64
Photo 6 : Eprouvettes 7x7x28 cm	65
FIGURES	
Figure 1. Essai de traction par flexion	65
Figure 2. Influence de la nature des fibres sur leur dosage en superplastifiant à maniabilité constante	69
Figure 3. Mesure de l'air occlus des différents mélanges.	70
Figure 4. Mesure de la densité des différents mélanges	71
Figure 5. Résistance à la compression	72
Figure 6. Charges de rupture à la compression.	73
Figure 7. Résistances à la traction	74
Figure 8. Charges de rupture à la traction par flexion	75

CHAPITRE III : COMPORTEMENT MONOTONE

TABLEAUX	
Tableau 1. Composition des mélanges pour 40 litres (capacité du malaxeur)	82
Tableau 2. Essais sur bétons frais	82
Tableau 3. Essais sur bétons durcis. Résistances et charges de rupture	82
Tableau 4. Essais statiques monotones	83
Tableau 5 : flexion 4 points sur éprouvettes 10x10x120 cm	84
Tableau 6. Résistance à la flexion d'après SWAMY	86
Tableau 7. Résultats des essais mécaniques en flexion.	89
Tableau 8. Indice de ténacité des mélanges	93
PHOTOS	
Photo 1 : Rupture d'une éprouvette renforcée de fibres industrielles	87
Photo 2 : rupture d'une éprouvette renforcée de copeaux industriels BSP 50	87
Photo 3. Fissuration de la poutrelle	92
FIGURES	
Figure 1. Courbes Charge- Flèche	88
Figure 2. Diagrammes de contrainte et de déformation	91
GRAPHES	
Graphe 1. Charges de première fissuration. Eprouvettes 10x10x120 cm	84
Graphe 2. Charges de rupture. Eprouvettes 10x10x120 cm.	85

CHAPITRE IV : COMPORTEMENT DIFFERE

TABLEAUX	
Tableau 1 : Eléments de volume macroscopique	104
Tableau 2. Temps caractéristique et type d'essai	105
Tableau 3 : composition du béton pour 1 m ³	108
Tableau 4. Récapitulatif des résultats	109
Tableau 5. Programme expérimental : essais sous charges maintenues	109
PHOTOS	
Photo 1. Bâti de fluage	99

Photo 2. BSF au MEB	123
Photo 3. BSF au MEB	124
Photo 4. BSF au MEB	124
Photo 5. BFI50 au MEB	125
Photo 6. BFI50 au MEB	125
Photo 7. BFI50 au MEB	126
Photo 8. BSP50 au MEB	126
Photo 9. BSP50 au MEB	127
Photo 10. BSP50 au MEB	127
Photo 11. BSP25 au MEB	128
Photo 12. BSP25 au MEB	128
Photo 13. BSP25 au MEB	129
FIGURES	
Fig.1. Schématisation de l'essai de flexion quatre points	106
Fig. 2. Eprouvette soumise à la flexion quatre points.	107
GRAPHES	
Graphe 1. Comportement des bétons de référence (sans fibres)	110
Graphe 2. Comportement des bétons renforcés de fibres industrielles.(l = 50 mm)	111
Graphe 3. Comportement des bétons renforcés de copeaux industriels (l =50 mm)	112
Graphe 4. Comportement des bétons renforcés de copeaux industriels (l = 25mm)	113
Graphe 5. Fluage des bétons sous charge constante de 150 Kg.	114
Graphe 6. Fluage des bétons sous charge constante de 50 % de la charge de rupture.	115 116
Graphe 7. Fluage des bétons sous charge variable de 150 Kg par palier de 50kg	117
Graphe 8. Fluage des bétons sous poids propre (retrait)	118
Graphe 9. Fluage des copeaux métalliques	119
Graphe 10. Flèches instantanées	
HISTOGRAMMES	
Histogramme 1. Flèches instantanées	120
Histogramme 2. Déformations instantanées et de 1 ^{ère} fissuration	120

Les matériaux utilisés pour la fabrication de constructions et d'équipements ont, de tout temps, défini le niveau de notre civilisation technique. La réalisation des objectifs communs de notre monde en développement est en grande partie tributaire de la mise au point de matériaux et de procédés de transformation et d'assemblage nouveaux, présentant des performances inédites ou améliorées.

La réussite des efforts entrepris pour le développement de matériaux adaptés aux besoins de demain dépend d'une intégration de connaissances précises, de méthodes théoriques de modélisation et de prévisions du comportement, ainsi que d'installations techniques sophistiquées. Le point de départ de la conception d'un produit industriel est une idée innovante ou un besoin du marché. Dans notre cas, on allie les deux, l'innovation par l'utilisation de produits recyclables locaux et les besoins du marché par la connaissance un peu plus approfondie du comportement de ce matériau sur le long terme.

Nous sommes dans deux démarches de conception :

- une conception adaptive puisque nous partons d'un concept déjà existant, le béton renforcé de fibres métalliques existe depuis plusieurs années déjà.
- Une conception de variation puisque nous opérons un changement dans les paramètres sans que la fonction ou le principe de réalisation soient modifiés.

Un matériau est de la matière avec une fonction. Cette fonction est remplie par une pièce qui a une forme et qui est constituée de matière qui a des propriétés.

Toute pièce a une ou plusieurs fonctions : supporter une charge, une pression, transmettre la chaleur etc. Le type de chargement est souvent décomposé en des efforts de traction, de compression, de flexion ou de torsion. La plupart du temps un effort est dominant. Ceci explique pourquoi le nom des pièces traduit souvent leur mode de chargement : une barre travaille en traction, une colonne en compression, une poutre en flexion et un arbre en torsion. Ainsi, chacun des mots barre, colonne, poutre, arbre traduit l'effort mécanique appliqué, ce qui simplifie la description de l'utilisation d'une pièce. Notre étude s'est effectuée sur des poutrelles et donc l'effort dominant est celui de flexion.

Notre travail s'est fait en tenant compte d'une sélection multi astreinte (ouvrabilité, rapport E/C, squelette granulaire, pourcentage de fibres) et d'une sélection mono objective (comportement différé : fluage).

En cours de fonctionnement, un matériau est soumis à des agressions de tous ordres, agressions chimiques pouvant donner lieu à de la corrosion, à des sollicitations mécaniques prolongées pouvant conduire à des déformations irréversibles voire à des ruptures différées

et à des sollicitations de contact conduisant à l'usure du matériau constitutif de la pièce. Ces sollicitations diverses peuvent conduire en un temps fini à la ruine du matériau et à la rupture de la pièce, ou plus sournoisement, à l'apparition de jeux dans la mécanique, et en tout cas, à un mauvais fonctionnement du composant. Une fois identifiées les conditions de fonctionnement du composant en terme de milieu, de température, de chargement mécanique, il convient de se poser la question « Y a-t-il un risque d'endommagement différé ? ». Nous entendons par là quatre types de problèmes potentiels, le fluage, le retrait, la fatigue, la corrosion et l'usure. Ces problèmes appellent deux classes de réponse, l'une conduisant à éviter totalement l'endommagement et l'autre conduisant à le garder sous contrôle pendant le temps de vie escompté pour le matériau.

L'ambition de notre étude est d'aboutir à des résultats qui puissent donner des informations inédites sur le comportement différé, ici, le fluage à un jeune âge de bétons renforcés de différents types de fibres et sous différents taux de chargements.

L'efficacité d'une poutre dépend non seulement du matériau mais aussi de la forme de celle-ci. Par efficacité nous comprenons la résistance aux conditions mécaniques de rigidité et de solidité imposée par l'application des résultats obtenus. Dans le cadre de notre expérimentation, la forme choisie ne peut être quelconque, elle a été établie sur la base que les poutres de structure en béton sont dans la majorité des cas de section rectangulaire et d'inertie constante sur la longueur. Les travaux antérieurs effectués pour la détermination des déformations en flexion se font généralement sur le même modèle de poutrelles pour lequel nous avons opté.

Il faut souligner que la finalité pour tout travail, et en particulier dans la recherche, est de trouver une application réelle et pratique pour une utilisation sur terrain dans le domaine concerné. Un travers fréquent des universitaires développant des nouveaux matériaux est de focaliser leurs efforts sur la propriété la plus « spectaculaire » en oubliant qu'une application concrète correspond à un compromis de propriétés répondant à un cahier des charges souvent complexe. Cette obsession de la propriété exceptionnelle, plus valorisante que la notion de compromis intéressant, conduit malheureusement à proposer des matériaux d'avenir qui restent éternellement des matériaux du futur.

Une nouvelle dimension entre dans la conception des nouveaux matériaux c'est l'aspect environnemental. Nous devons prendre en considération, et ce dans le cadre d'une préoccupation mondiale d'un développement durable, comment minimiser les dégâts sur l'environnement associés à la production de l'objet industriel, comment optimiser l'impact

des nouveaux matériaux associés à leur utilisation sur l'environnement et comment introduire l'utilisation de produits recyclés dès la conception de ces nouveaux composants.

Le développement durable est une approche où il ne s'agit plus seulement de respecter au mieux notre environnement quotidien mais il faut développer des activités industrielles qui satisfont nos besoins actuels sans compromettre la qualité de vie des générations futures. Une des solutions les plus prisées, actuellement, est le recyclage de tous les déchets engendrés par l'industrie à des niveaux et des utilisations différents. La démarche n'est pas nouvelle mais tend à faire tache d'huile d'où notre intérêt pour l'incorporation de copeaux métalliques issus de déchets de pièces de moteur.

Les objectifs à développer sont : l'utilisation des bétons de fibres métalliques en adaptant des méthodes traditionnelles de fabrication et de mise en œuvre, des corps d'épreuve représentatifs d'éléments structurels de faible épaisseur, la mise en place et en service d'un bâti d'essai à la flexion quatre points, l'application des résultats pour le développement d'un nouveau matériau.

Le premier chapitre fera l'objet d'une revue de la documentation scientifique offrant une présentation générale concernant le béton renforcé de fibres métalliques, sa composition, sa formulation et ses différentes propriétés mécaniques. Une description des mécanismes de fluage et de retrait est donnée avec tous les paramètres pouvant avoir une influence sur le comportement des bétons renforcés de fibres métalliques.

Le deuxième chapitre est consacré à la définition, à la caractérisation des quatre mélanges utilisés par l'exécution d'une batterie d'essais adaptés. Une fiche d'identification a pu être établie.

Le troisième chapitre donne les résultats expérimentaux obtenus sous comportement monotone des bétons renforcés de fibres métalliques avec analyse et commentaires concernant le taux de chargement et le seuil de première fissuration.

Le quatrième chapitre met en exergue les résultats expérimentaux du comportement différé des poutrelles et la détermination des déformations du fluage et du retrait pour un béton témoin sans fibres, un béton renforcé de fibres métalliques industrielles normalisées, un béton renforcé de deux types de sous produits industriels sous différents taux de chargements avec interprétation et discussion des résultats. Une étude comparative est faite pour mettre en évidence l'importance des taux de chargements et l'influence des caractéristiques géométriques des fibres.

Nous donnons pour finir, les résultats des essais faits sur microscope électronique à balayage. Il semblait intéressant d'examiner la microstructure des bétons étudiés, et plus particulièrement la qualité des liaisons fibres – liant avec une idée sur le développement des microfissures.

L'utilisation des bétons renforcés de fibres est une idée qui est devenue réalité depuis plus de quarante ans, nous voulons avec ce travail offrir une ouverture sur les possibilités à exploiter à notre niveau. Il y a beaucoup à faire dans ce domaine avec des produits recyclables. Le béton évolue et est en passe de devenir un matériau incontournable dans tous les domaines de la construction : structures, éléments minces préfabriqués, mobilier urbain et même décoration intérieure. Des études plus poussées sur le fluage à long terme, sur l'effet d'ajouts ou sur un traitement particulier des fibres recyclées pour améliorer les résistances sont à considérer.

1. Généralités

Toute étude bibliographique est une synthèse de l'art. Sa conclusion et sa critique permettent de dégager les caractéristiques principales que doit posséder le matériau présenté dans cette thèse, en l'occurrence le béton armé de fibres métalliques.

Notre approche expérimentale est basée sur les principes de mécanique des milieux continus et de certaines lois comportementales. Le choix du matériau est au centre du processus de conception d'un produit mécanique. Un matériau nouveau apporte de nouvelles idées et de nouvelles possibilités de création, il est au cœur de l'innovation. En l'utilisant le chercheur va pouvoir améliorer la solution technologique en lui donnant un volume, un poids, une résistance. L'objectif essentiel réside dans l'étude et l'optimisation des propriétés mécaniques et physiques des matériaux hétérogènes et poreux rencontrés en génie civil notamment le béton renforcé de fibres métalliques.

La démarche est multiple, elle consiste à développer à la fois des études expérimentales et des travaux de modélisation avec pour finalité l'aboutissement du transfert technologique du laboratoire vers les chantiers ou l'industrie. Il est nécessaire d'allier les propriétés mécaniques des matériaux au comportement des structures avec pour objectif l'optimisation des dimensionnements des éléments et la prédiction de leur fonctionnement sous sollicitations spécifiques.

De nos jours, le béton doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement, d'aspect. La technologie du béton ne cesse dès lors de se compliquer. On a ainsi assisté à l'émergence de nouveaux bétons (B.H.P, auto plaçant, auto compactant, recyclés etc.). De plus, des nouveaux matériaux, permettant d'accroître les performances des bétons de manière significative, ont été introduits dans sa composition, à l'instar des fibres métalliques. Ces nouveaux bétons nécessitent souvent une adaptation des méthodes traditionnelles de fabrication et de mise en œuvre.

L'évolution dans la conception des ouvrages en béton a nécessité, de la part des concepteurs et maîtres d'ouvrages, non seulement la recherche pour l'obtention d'un ouvrage simplement fonctionnel mais aussi une intégration plus harmonieuse de ce dernier et une durée de vie plus élevée et enfin un coût des plus faibles possible. Parmi ces évolutions, une discipline à part entière de la conception des ouvrages en béton a émergé,

la durabilité des structures. Cette durabilité trouve son expression aussi bien du point de vue de l'intégrité mécanique de l'ouvrage que dans celui de la tenue en service. Ainsi, il n'est plus seulement requis de réaliser le dimensionnement d'un ouvrage comme un cas particulier mais aussi d'y intégrer des contraintes de résistance dans le temps, de résistance à des agents agressifs etc. en tenant compte que le fluage est une contrainte à part entière.

2. Composition des bétons de fibres

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

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

Ces matériaux sont très récents pour un secteur comme le génie civil, où innover est difficile. Les composites « ciment - fibres » et « bétons - fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, panneaux décoratifs, encadrements, dallages, voûtes de galeries, isolation, réparation, mobilier urbain...

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

Le béton est un matériau poreux et fragile, doté d'une faible résistance à la traction donc sujet à la fissuration. C'est un matériau composite, donc un solide polyphasé dans lequel tous les constituants sont associés en vue de lui conférer, à l'échelle macroscopique et au moins dans certaines directions, un ensemble original de propriétés que les constituants pris isolément ne peuvent pas atteindre.

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

D'un point de vue général et simplifié, les composites ciments fibres sont constitués des deux phases suivantes :

- la matrice cimentaire
- les fibres de renfort

La valorisation des sous produits est devenue une priorité dans la recherche appliquée et touche au domaine du développement durable.

L'objectif est de recycler des « déchets » industriels d'une part pour participer rationnellement à une économie de récupération et d'autre gagner en autonomie en utilisant des produits locaux ne demandant pas de gros investissements puisqu'ils sont utilisés tels quels et ne nécessitent pas de transformation .

La composition de la matrice doit répondre à des exigences de compacité et de fluidité, la résistance à la 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 traction des matrices cimentaires et conduit à l'utilisation de différentes tailles et provenances de fibres. Cette matrice cimentaire est composée de ciment, d'eau et de granulats.

2.1 Présentation du matériau béton

L'histoire du béton remonte à 2000 ans avant J.C. Ce sont les romains, qui les premiers ont inventés une pâte « dure comme la pierre », à base de chaux vive. Plus tard (19^{ème} siècle), les véritables recherches approfondies sur les propriétés de la chaux furent entrepris par SMEATON, VICAT et ASPDIN qui montrèrent dans un premier temps que le clinker issu de la calcination du mélange « calcaire – argile » (particules anhydres) fournissait une meilleure hydraulicité au liant. En 1855, du gypse (SO_3) en petite quantité ajoutée au clinker, permit d'obtenir au contact de l'eau, une étringite (mélange formant une étroite des constituants par une réaction chimique), homogène et maniable pendant un laps de temps . Ce mélange original « gypse – clinker » fut breveté et possède encore aujourd'hui l'appellation Ciment Portland Artificiel. Puis rapidement les mortiers et les bétons furent mis en œuvre en introduisant dans la pâte de ciment respectivement du sable ou des granulats. En parallèle à de nombreuses recherches sur leur composition et leur comportement ces « nouveaux matériaux composites » furent rapidement employés dans la construction.

Les résultats d'analyse des différentes phases (ciment – granulats – eau) précisent l'influence de chacun des constituants. Classiquement, le ciment Portland se compose d'environ 50% de silicate tri calcique (C_3S), 20% de silicate bi calcique (C_2S), 5% d'alumino - ferrite tétra calcique (C_4AF) et 15% d'aluminate tri calcique (C_3A). [$C = CaO$; $S = SiO_2$; $A = Al_2O_3$; $F = Fe_2O_3$].

Lors de l'hydratation du ciment, une forte teneur du composé C_3S contribue à l'augmentation rapide de la résistance au jeune âge avec un fort dégagement de chaleur. Cette réaction exothermique est accentuée par la présence de C_3A qui constitue un élément chimique essentiel dans la fabrication du ciment et pour l'obtention d'une étringite homogène en combinaison avec le composé C_4AF . [1] Cependant ces gradients thermiques sont la source de fissuration au sein de l'élément de béton car la température peut atteindre $70^\circ C$. Le pourcentage de C_3A doit alors être le plus faible possible car il est également plus vulnérable aux sulfates et sa forte teneur implique un dosage plus important en gypse. Même si l'action du gypse peut entraîner un fluage plus important du béton à court terme (dû à la finesse du liant), il ne possède aucune influence à long terme. Seul le composé C_2S agit sur le comportement à long terme du béton car sa réaction est plus lente. Il contribue principalement au développement de la résistance. C'est pourquoi les bétons du début du 20^{ème} siècle, à la forte teneur en C_2S , ont développé une résistance à long terme, deux fois supérieure à celle obtenue à 28 jours. Actuellement, les bétons confectionnés possèdent une teneur en C_2S nettement plus faible, qui ne permet pas de tenir compte d'une augmentation de la résistance au-delà de 28 jours, mais plutôt, d'une diminution après 10 ans de maturité. [1]

L'hydratation du ciment n'est jamais complète (60 à 70% des particules sont hydratées). Isolées de tout contact avec l'extérieur, les particules anhydres peuvent attendre des années avant d'être enfin en contact avec un composé permettant l'hydratation. Un béton âgé de 100 ans peut encore développer des réactions d'hydratation. La phase solide ou xérogel [2] obtenue par hydratation est beaucoup plus poreuse à l'interface entre la gel de ciment et le granulats. Cette couche d'interface de plus faible résistance appelée aussi « auréole de transition » est composée de fines aiguilles d'étringite et de particules d'hydroxydes de calcium non réactives enveloppant le grain inerte. Elle est la zone de fissures prépondérante de par sa plus grande porosité (capacité de rétention d'eau importante accentuée par la porosité du granulats) et sa structure fragile en aiguilles qui lui confère une plus faible résistance aux efforts de traction et de cisaillement.

Le béton généralement caractérisé par des essais à 28 jours, présente en vieillissant une configuration thermo dynamiquement instable compte tenu des réactions encore possibles à long terme. [2] Au-delà d'une consistance plastique initiale au moment de la mise en œuvre (viscosité importante), le béton développe tout au long de sa vie, une fragilité accrue caractérisée par une rupture plus brutale. [3]

Les propriétés des bétons tentent d'être améliorées en fonction de leur utilisation (structures, réparation). C'est pourquoi, de plus amples recherches s'attachent à déterminer l'effet d'ajouts cimentaires (cendres volantes, laitiers, fumée de silice..) qui apportent des propriétés intéressantes au béton (ouvrabilité, résistance, porosité, facilité de mise en œuvre) et celui d'additifs chimiques tels que les plastifiants qui agissent sur l'ouvrabilité des bétons. Cependant leurs effets nécessitent des études approfondies sur le comportement différé à court et à long terme des bétons.

2.2 Nature des fibres

Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface. Par leurs caractéristiques, différentes les unes des autres, les fibres sont définies suivant quelles soient naturelles ou artificielles. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. Le tableau 1 représente les différents types de fibres et le tableau 2 donne leurs principales caractéristiques. [4]

Fibres naturelles		Fibres artificielles	
végétales	animales	minérales	organiques
Lin	Poil	Laitiers	Polypropylène
Chanvre	Laine	Carbone	Polyamides
Celluloses	soie	Métaux (acier, fonte)	polyesters
Sisal		Verres spéciaux	
coir		amiante	

Tableau 1. Différents types de fibres.

Fibres	Diamètre (μm)	Long (mm)	densité	Rt (Mpa)	E (10^3 Mpa)	Allongement à La rupture en %	Coeff. De Dilatation (μ/ m)	R _{feu} Temp. Max °C
Acier	5 – 500	20 – 80	7.8	1000- 3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36 x2600 de section	50 – 60	7.8	2500	140	1		1500
Verre	5 – 20	40 – 70	2.6	1500- 3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10 – 200	25 – 75	0.9	400- 750	5-10	15-25	90	150
Polyester			1.4	700- 850	8	11-13		
Amiante	0.02 – 20	5	2.5 – 3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
Carbone	5 – 9	Variable	1.7 – 2	2000- 3000	250- 400	0.5-1.5		400- 1500
sisal	10 - 50	1.50	1.5		130	3		

Tableau 2. Principales caractéristiques physiques et mécaniques
des fibres les plus utilisées. [5]

Les fibres d'acier sont souvent produites sous différentes formes (droites, lisses, ondulées, à crochets etc.). Les fibres d'acier ont fait l'objet de nombreuses recherches pour le développement de leur utilisation dans le béton, en tant que dallages, bétons projetés, éléments préfabriqués, éléments de réparation etc. De par leurs propriétés, les fibres d'acier apportent d'importantes solutions aux matrices fragiles : moindre fissuration au retrait, meilleure ductilité de la structure renforcée etc. [6]

2.3 Effet de l'orientation et de la distribution des fibres [7]

L'utilisation de deux grandes familles de fibres métalliques a permis de distinguer un fonctionnement mécanique différent :

- les fibres qui fonctionnent par adhérence. Elles sont généralement droites et ont une surface spécifique très importante. Leur intérêt est de limiter fortement les ouvertures des fissures.
- Les fibres qui fonctionnent par ancrage. Elles ont une surface spécifique peu importante. Leur ancrage est réalisé soit par des crochets ou des têtes placées aux extrémités de la fibre, soit par des ondulations disposées tout au long de la fibre.

Les fibres utilisées pour notre étude travaillent par ancrage de par leur forme et du fait d'une surface spécifique importante. Il est primordial d'optimiser le choix de la fibre (caractéristiques géométriques et mécaniques) en fonction de la compacité de la matrice. Il ne faut pas oublier dans le choix de la fibre que celle-ci doit avoir une longueur deux à trois fois supérieure au diamètre du plus gros granulats et qu'elle peut avoir un très bon fonctionnement mécanique quand elle est positionnée manuellement au sein de la matrice cimentaire.

Il existe une orientation préférentielle des fibres qui a un effet sur le comportement mécanique des bétons renforcés de fibres métalliques.

Ainsi, dans une structure et un chargement mécanique donné, les fissures apparaissent, généralement perpendiculairement aux contraintes maximales de traction. En suivant l'orientation préférentielle des fibres vis-à-vis des fissures créées, on pourra aller du très efficace (fibres perpendiculaires aux fissures) à la pire situation (fibres parallèles aux fissures).

Il est donc impératif d'optimiser la mise en œuvre d'un béton renforcé de fibres métalliques, ainsi que la façon dont il s'écoule, car cela intervient dans l'orientation préférentielle des renforts vis-à-vis du fonctionnement de la structure.

Dans le cas où le mélange peut s'écouler à l'intérieur du coffrage soit par gravité, soit sous l'effet d'une vibration, les fibres ont tendance à s'orienter parallèlement aux lignes de courant de l'écoulement du fluide visqueux que constitue le béton. Cette tendance augmente lorsque le rapport distance d'écoulement sur longueur de la fibre augmente.

Pour la distribution des fibres, on est dans le cas d'une mise en œuvre de bétons en laboratoire, donc on s'intéresse à la manière dont le béton est mélangé et aussi sa mise en place dans les moules. Comme les corps d'épreuves sont relativement petits par rapport aux éléments de structure, ils excluent un écoulement important et les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface des moules où le mélange est introduit.

3. Formulation des bétons de fibres

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué durant ces dernières années. Tout d'abord, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres, sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments. Ensuite on s'est intéressé à un nombre croissant de propriétés d'usage du matériau en relation avec la totalité de son cycle de vie (depuis son comportement rhéologique à l'état frais jusqu'à sa durabilité dans différentes ambiances). Enfin, la gamme des propriétés que l'on peut atteindre avec les moyens industriels modernes s'est singulièrement élargie, on rappellera que les deux aspects communément étudiés dans une formulation de béton, à savoir la maniabilité et la résistance en compression. On sait aujourd'hui formuler des bétons secs (d'affaissement nul) comme des bétons auto compactant ou auto nivelant. De même, toute une gamme de résistances a été explorée allant de 1 à 2 MPa, pour des matériaux ré excavables destinés au remplissage de tranchées, à des résistances très élevées qui peuvent être supérieures à 200 MPa pour des mortiers à ultra haute résistance destinés à la fabrication de conteneurs de déchets radio actifs, par exemple.

En résumé, le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables et de dimensions tout en tenant compte que l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste. L'approche scientifique du béton s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues :

- l'empilement sec dont on cherche à prévoir la compacité et la ségréabilité
- l'empilement humide (béton frais) intéressant par ses propriétés rhéologiques

-
- l'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une matrice de pâte de ciment durcie. [8]

On peut ainsi définir la formulation comme :

Formulation classique d'un béton		
Maniabilité	Résistance à la compression	
Problème actuel de la formulation des bétons		
Davantage de variables	Espace de recherche beaucoup plus grand	Davantage de dimensions
Approche scientifique du béton		
Analyse de la structure granulaire		
Trois étapes parcourues		
L'empilement sec : compacité et ségréabilité	L'empilement humide (béton frais) : propriétés rhéologiques	L'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une pâte de ciment durci

Tableau 3. Définition de la formulation

La formulation de béton a tenu compte de l'application des trois hypothèses fondamentales de cette méthode (BARON – LESAGE) [9] donne :

- E/C fixé au départ : le béton le plus maniable est celui qui a le squelette granulaire le plus compact.
- Les proportions optimales en granulats ne dépendent pas de la nature et du volume du liant
- L'introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.

On se doit d'établir au préalable :

- Le rapport eau – liant
- Le diamètre du plus gros granulat
- La géométrie et les dimensions de la fibre

- Le pourcentage des fibres
- La maniabilité souhaitée
- La variation du rapport massique $S / S+G$ avec la maniabilité correspondante : si la maniabilité voulue n'est pas atteinte, il faudra augmenter ou diminuer le volume de liant ou ajouter un super plastifiant.

Remarque :

Pour déterminer la maniabilité, on peut utiliser le cône d'Abrams ou le maniabilimètre LCL. Le premier ne donne pas de résultats intéressants de part la quantité de mortier utilisée.

Le deuxième est un essai dynamique qui met en évidence l'aptitude du béton à se mettre en place sous vibration. La maniabilité est alors caractérisée par le temps d'écoulement.

Dans le cas des BRFM, il est préférable d'utiliser le second appareil et ceci pour deux raisons :

- lorsque le pourcentage des fibres est relativement important (supérieur ou égal à 50 kg/m^3 par exemple), il devient difficile d'observer des affaissements significatifs des BRFM, ce qui rend la détermination du squelette minéral optimal imprécise (courbe plate).
- Le volume de matériau testé avec le cône d'Abrams est relativement faible, en l'occurrence 6 litres, alors que le maniabilimètre LCL opère sur 30 litres. Ce dernier permet donc d'accéder à une information plus représentative du comportement rhéologique du BRFM frais, et particulièrement quand les fibres métalliques incorporées ont une longueur 50 à 60 mm.
- La maniabilité souhaitée s'obtient, soit en ajustant la quantité de liant, soit en faisant varier la quantité de super plastifiant. Le choix entre ces approches présente pour chacune d'entre elles des avantages avérés mais aussi quelques inconvénients. En effet, l'augmentation de la quantité de liant présente un intérêt double. D'une part, elle permet un meilleur enrobage des fibres, ce qui aura pour conséquence un fonctionnement mécanique ultérieur meilleur de celles ci dans la matrice durcie et d'autre part cette augmentation permet une finition plus aisée de la surface des structures en BRFM conduisant à une surface moins « hérissée » des fibres, tant dans les parties coffrées que dans les autres.

Cette approche génère également certains inconvénients tels une augmentation des retraits thermiques et hydrauliques, du fluage et de l'exothermie du BRFM, lesquels peuvent éventuellement occasionner des problèmes mécaniques.

- L'inconvénient majeur de l'utilisation des super plastifiants est leur coût, généralement élevé.

La caractérisation des BRFM durcis nécessite la définition des corps d'épreuves sur lesquels seront mesurés les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai réalisées et on tient compte de:

- types des corps d'épreuves (éprouvette classique, poutrelles)
- de la géométrie des corps d'épreuve (épaisseur, élancement)
- du type de chargement (réparti, ponctuel) et sa vitesse
- du mode d'asservissement (en effort, en déplacement ou en mode mixte)
- mode d'introduction des fibres

La modification du squelette granulaire d'un BRFM par rapport à un béton sans fibres est que le squelette optimal très différent de celui d'un béton sans fibres. L'importance de cette modification est étroitement liée à certains paramètres tels que :

- le type de fibres utilisées (forme géométrique, type de matériau, dimension de la fibre...)
- le pourcentage de fibres
- le rapport L_f / Φ_g (longueur de la fibre / diamètre du plus gros granulat)
- $S / S + G$ augmente avec le pourcentage de fibres
- $S / S + G$ augmente avec $L_f / \Phi_g = 1$ à 3
- Pour $1 > L_f / \Phi_g > 3$, seul intervient de manière significative le pourcentage des fibres.

L'introduction de la fibre au sein du squelette granulaire va se traduire localement, c'est à dire autour de chaque fibre par un desserrement du squelette granulaire, similaire à un effet de paroi. Ainsi un certain volume des plus gros granulats va être « remplacé » par un certain volume de fibres, ce qui contribue à un « enrichissement » en éléments fins du squelette granulaire. Cette modification de l'empilement granulaire est schématisée dans la figure suivante. On analyse le problème tridimensionnel de cet empilement par une analyse bidimensionnelle.

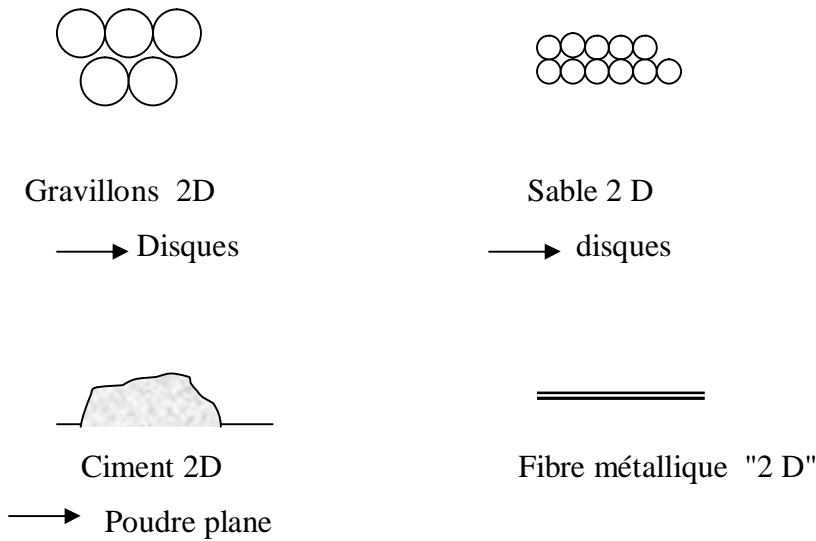


Fig1. Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BRFM

Considérant ce qui précède, il est facile de comprendre qu'une fibre ayant la forme d'un ruban conduise, du fait de sa plus grande surface spécifique, à des effets de paroi locaux plus importants qu'une fibre cylindrique, et donc perturbe plus l'empilement granulaire de la matrice.

On doit prendre en considération que :

- La composition des BRFM est complètement différente de celle d'un béton courant, ce qui se traduit le fait qu'un composite fibré ne s'obtient pas en introduisant simplement des fibres dans une matrice cimentaire donnée.
- Du point de vue de la maniabilité et de la compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire à celui des gros gravillons.
- La méthode de composition utilisée conduit à des BRFM contenant beaucoup de pâte de ciment, ce qui est très bénéfique vis-à-vis de l'adhérence entre les fibres et la matrice. [10]

4. Propriétés mécaniques

4.1 Résistance à la compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences. Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution. Dans la matrice, la fibre peut avoir deux effets contradictoires : celui en premier de maintenir les fissures ce qui est favorable pour la phase post pic, et celui en second de créer des défauts supplémentaires à l'interface fibres - mortier ce qui peut contribuer à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

4.2 Résistance à la traction directe

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. D'après la bibliographie, les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées, et bien sûr au béton témoin retenu.

Donc on constate que pour tous les BRFM, les résistances à la compression et à la traction sont inférieures ou à peu près égales à celles du béton de référence. Ceci confirme que les fibres métalliques n'interviennent pas d'une manière significative sur le comportement à l'échelle du matériau. Nous pouvons résumer ces résultats de la manière suivante :

- la quantité de sable et de pâte de ciment étant plus importante dans les BRFM que dans les bétons sans fibres la porosité de ces BRFM est également plus importante. Par conséquent si l'on se réfère à la loi de FERET, on en déduit une chute logique des résistances
- l'ajout de fibres dans la matrice perturbe notablement celle-ci en y introduisant des vides (effets de voûte, effets de parois)

- Dans les BRFM, il y a moins de gros graviers que dans les bétons sans fibres, et il semblerait que ceux-ci jouent un rôle non négligeable dans la résistance du béton [10]

4.3 Résistance à la flexion

Le renforcement par des fibres métalliques est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire. En flexion, contrairement à ce qui est généralement observé en traction directe avec ce type de fibres, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure. Un peu comme en béton armé classique, la déformation de flexion s'accompagne du développement d'une fissuration et du déplacement vers le haut de l'axe neutre.

4.4 Résistance à la fatigue

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés des matériaux consécutive à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture. Ainsi d'une manière très générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent inférieures à la limite d'élasticité, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois.

La résistance à la fatigue des éléments en béton est conditionnée par de nombreux facteurs :

- en particulier, les conditions d'application des sollicitations cycliques qui peuvent modifier sensiblement la résistance à la fatigue d'une structure.
- Une distinction est généralement faite entre une fatigue avec un cycle à basse fréquence, mais un niveau de contrainte élevé et une fatigue à haute fréquence mais à un niveau de contrainte faible.

Ceci correspond à deux types d'étude, par exemple d'une part le séisme et d'autre part l'action du vent et des vagues. Bien que la distinction entre les deux types de chargement ne soit pas très précise, conventionnellement 1000 à 10000 cycles sont choisis comme limite entre les deux types de chargement.

5. Fissuration du béton et actions mécaniques

La réponse mécanique du composite est liée au processus de fissuration qui se développe. Les fibres ont deux rôles : d'une part elles sont susceptibles de retarder l'apparition de la macro fissuration de la matrice et d'autre part elles réalisent une couture sur les lèvres de la macro fissure formée dans l'éprouvette ; ce qui apporte de la ductilité au matériau.

Durant la première phase, la microfissuration se répartit uniformément dans le volume. Le matériau peut être caractérisé par une loi comportementale. Enfin pour augmenter la résistance à la fissuration il semble logique d'utiliser un fort pourcentage de fibres courtes. Durant la deuxième phase, le développement de la macro fissure est fortement dépendant des conditions aux limites du corps d'épreuve. Des fibres longues bien ancrées et ductiles offriront une meilleure résistance à l'ouverture des fissures.

5.1 Diverses causes et périodes d'apparition des fissures

L'apparition de fissures dans les structures en béton est un phénomène courant et difficilement évitable, source d'inconvénients voire de litiges ainsi qu'il en ressort des expertises auxquelles elles donnent souvent lieu. Les fissures peuvent apparaître de différentes manières :

- les fissures précoces : elles apparaissent sur le béton frais immédiatement ou quelques heures seulement après le bétonnage. Elles sont dues au tassement du béton frais partiellement empêché par la présence des fibres et au retrait plastique qui correspond à une déshydratation du béton frais sous les effets combinés de la température extérieure et du climat.
- Les fissures d'origine mécanique : elles apparaissent sur le béton en voie de durcissement (quelques jours ou semaines après le bétonnage) ou déjà durci
-

(quelques mois ou années après la construction), ces fissures sont la conséquence de l'apparition de sollicitations excédant la capacité de déformation du béton ou sa résistance à la traction et sont dues à des déformations ou des charges imposées à l'ouvrage.

- Les fissures d'origine physico-chimiques apparaissent quelques années après la construction, elles sont la conséquence des phénomènes de gonflement ou de réactions chimiques (corrosion des fibres, réactions alcali – granulats), ou à des efforts physiques (gel de l'eau dans les pores du béton) qui peuvent entraîner une fissuration et un éclatement d'enrobage.

5.2 Distinction entre fissuration sous charges ou sous déformations imposées

Les déformations imposées sont les déformations intrinsèques du matériau. Elles sont dues au retrait thermique, au retrait hydrique, au fluage, donc à des phénomènes internes à l'élément considéré. Dans de tels cas, les risques de fissuration peuvent être considérablement réduits grâce à une composition appropriée du béton. Les fissurations sous charges imposées sont dues aux tassements différentiels, aux variations climatiques donc à des phénomènes externes à l'élément considéré. Dans ce cas le recours à des bétons améliorés ne s'avère guère efficace.

5.3 Durabilité des bétons renforcés de fibres métalliques

La durabilité du béton est liée à la facilité de pénétration des substances telles que le dioxyde de carbone, les chlorures, l'oxygène et l'eau. Les problèmes liés à la compacité du matériau influent sur l'altération des composants du béton. Le béton peut être attaqué par plusieurs facteurs, qui le dégradent plus ou moins. Ceux-ci peuvent être classés comme endogènes et exogènes et leurs origines sont variables.

origine	endogène	Exogène
chimique	- hydratation - alcali-réaction	- carbonatation - pénétration d'agents agressifs
physique	-auto dessiccation - chaleur d'hydratation	- température - hygrométrie
mécanique	- granulats	- sollicitations de service - sollicitations accidentelles

Tableau 4. Facteurs influents sur la durabilité

La seule problématique de durabilité spécifique aux bétons renforcés de fibres métalliques est la corrosion des fibres. Si l'on doit faire une comparaison avec les bétons non fibrés, le phénomène est assez similaire à la corrosion des armatures de béton armé. Deux situations sont à prendre en compte dans l'analyse de la corrosion des fibres métalliques, et de ses conséquences :

- le cas où la fibre ne traverse pas une fissure débouchant en surface.
- le cas où la fibre traverse une fissure débouchant en surface

5.3.1 Cas n°1

Normalement, le béton assure la protection des fibre vis-à-vis de la corrosion. En fait deux processus peuvent altérer cette protection [11] :

- l'évolution de la phase aqueuse interstitielle dont le pH diminue à la suite de la transformation des composés hydratés du ciment et qui n'offre plus la protection souhaitable à la fibre métallique. C'est principalement la réaction de carbonatation du béton, à partir du dioxyde de carbone contenu dans l'air qui est impliquée dans ce processus
- la pénétration d'agents agressifs, notamment les ions chlore jusqu'au niveau des fibres

Il faut noter que, parmi les deux mécanismes d'altération, la carbonatation est un phénomène général pour les superstructures, tandis que la pénétration des chlorures est spécifique à certains environnements.

La capacité de protection offerte par le béton de fibres dépend principalement de la compacité du béton ou autrement dit, de sa structure poreuse et de l'épaisseur d'enrobage des fibres. Dans le cas des BRFM, ces deux paramètres ne sont pas indépendants. Il a été recommandé pour la formulation de ce type de béton, que l'ajout de fibres doit impérativement s'accompagner d'une modification du squelette granulaire de la matrice, modification qui se résume principalement à augmenter la quantité de ciment et le rapport sable / granulats quand le pourcentage de fibres augmente. Ces deux modifications concourent à produire un BRFM le plus compact possible, dans lequel les fibres sont enrobées de manière satisfaisante.

Dans la pratique, le BRFM contient assez de pâte de ciment pour éviter que trop de fibres se touchent, la corrosion des fibres si elle existe ne concerne que les fibres très proches de la surface. La propagation vers le cœur du matériau, se fait ensuite très lentement (la vitesse dépendant évidemment de la compacité de la matrice).

Les conséquences de la corrosion des fibres métalliques proches de la surface peuvent se décliner ainsi :

- création de salissures sur les parements des structures
- réduction des caractéristiques mécaniques des fibres (résistance en traction et rigidité) due à leur minimum de section induite par la corrosion. Il est à souligner quant à ce dernier point, que plus la section initiale de la fibre est petite, plus la perte des caractéristiques mécaniques de la fibre est importante.

Il faut signaler que les oxydes et hydroxydes formés à la surface des fibres n'induisent pas, dans la matrice, de contraintes suffisantes pour la fissurer. En effet, les réactions d'oxydation se font avec une augmentation de volume par rapport au métal de base, ce qui induit des pressions dans la porosité de la matrice environnante, pression qui sont fonction de la quantité d'oxydes formés. Or, dans le cas des fibres métalliques, les oxydes formés autour d'elles sont en très faible quantité.

En conclusion, en dehors de quelques salissures possibles, nuisibles pour l'esthétique des structures, la corrosion des fibres non traversées de fissures n'induit aucun problème grave pour la durabilité ou la capacité portante de ces structures en BRFM. Ceci a été clairement démontré lors d'une étude complète réalisée par l'ANDRA (agence nationale pour les déchets radioactifs). [12]

5.3.2 Cas n°2

C'est un cas sensible au regard des conséquences mécaniques potentielles relatives à la corrosion des fibres. C'est également un cas sur lequel il n'existe pas d'analyse approfondie et claire. L'analyse présentée se base sur les travaux de DUVAL [11] concernant le rôle de la fissuration dans le béton d'enrobage des armatures classiques de béton armé vis-à-vis de l'évolution du processus de corrosion de ces armatures (le mot fibre va remplacer armature dans ce qui suit).

De nombreuses études ont été consacrées à la détermination d'une largeur critique de fissure à partir de laquelle la vitesse de corrosion s'accroît de façon significative par rapport à un béton non fissuré. L'observation d'ouvrages en service et des expériences de laboratoire montre qu'il n'y a pas, statistiquement, de relation directe entre l'ouverture de fissure et le degré de corrosion, lorsque cette ouverture ne dépasse pas 0.3 – 0.4 mm. [13] L'explication qui est généralement avancée est la suivante : à l'endroit où la fissure la traverse, la fibre se trouve du fait de la carbonatation, à un pH plus faible qu'ailleurs. La corrosion va donc s'y faire préférentiellement. Mais, très rapidement les salissures et les produits de la corrosion vont obstruer le fond de la fissure, qui est rappelons le, très peu ouverte, ce qui contribue à freiner la corrosion (fig. suivante).

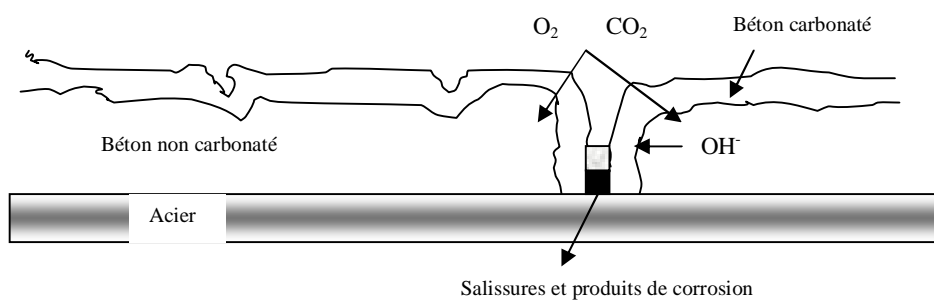


Figure 2. Mécanisme de corrosion des fibres en présence de fissure, et sans pénétration des chlorures

Le mécanisme de corrosion étant un mécanisme de pile électrochimique, qui implique l'existence d'une anode, d'une cathode et d'un milieu électrolytique. La zone où la fibre est traversée par la fissure (diffusion importante d'eau et de chlorures) est le siège de la réaction anodique (oxydation), ce qui implique que les parties avoisinantes (non fissurées) de la fibre sont susceptibles d'être le siège de réactions cathodiques (réduction). En conséquence, la vitesse de diffusion de l'oxygène et des ions OH^- au sein du béton non fissuré, donc de sa porosité. Ceci conduit à une situation complexe dans laquelle les fibres d'un BRFM très poreux (rapport eau / liant élevé) traversées par une fissure faiblement ouverte, peuvent se corroder plus rapidement que celles d'un BRFM peu poreux (rapport eau / liant faible), traversées par une fissure beaucoup plus ouverte. En conclusion, bien qu'aucune relation claire entre l'ouverture des fissures et la vitesse de corrosion ne soit actuellement établie, l'expérience montre que les fissures accélèrent, dans certaines conditions (présence de chlorures), cette vitesse de corrosion. Dans le cas des fibres métalliques, ceci peut avoir une conséquence mécanique importante où du fait de leur section très petite (comparée à celle des armatures classiques du béton armé), elles pourraient se dissoudre totalement entre des fissures correspondant à un comportement de structure en service, et ainsi occasionner une diminution non négligeable de la capacité portante et donc du degré de sécurité des structures en BRFM.

6. Fluage

Il y a différentes façons d'appréhender le fluage et de le définir. Dans la littérature, tous les auteurs se rejoignent pour dire que c'est un phénomène consistant en une augmentation de la déformation d'un système dans le temps sous l'application d'une charge constante. Pour ROSSI [10], il existe deux types de fluage d'origine physique différente qui interviennent simultanément dans la vie d'une structure :

- un fluage homogène appelé fluage propre qui est lié au mouvement de l'eau au sein du matériau.
- Un fluage hétérogène dû à un effet de structure provoqué avec les échanges avec l'extérieur.

Pour BERTHOLLET [14], l'incidence de l'eau vis-à-vis du mécanisme du fluage met en évidence plusieurs types de fluage :

- le fluage propre : dans des conditions de température et d'hygrométrie en équilibre avec les caractéristiques internes du matériau, le béton présente des déformations de fluage propre.
- Le fluage de dessiccation : dans ce cas, il existe quatre sources de fluage de dessiccation d'importance décroissante comme :
 - * Le retrait induit par la contrainte
 - * L'adoucissement de la déformation en traction induit par la progression de la fissuration
 - * L'irréversibilité au déchargement due à la contraction après l'adoucissement
 - * L'augmentation de la raideur du matériau due au vieillissement

Pour BENBOUDJEMA [15], il y a deux types de fluage :

- le fluage propre associé à la micro diffusion de l'eau adsorbée entre la porosité inter hydrates et intra hydrates, la porosité capillaire et le glissement des feuillets de CSH à l'échelle du macro pore.
- Le fluage de dessiccation induit par la micro diffusion de l'eau adsorbée à différentes échelles de porosité sous l'effet d'une sollicitation mécanique et hydrique combinées.

On peut en conclure que la déformation supplémentaire appelée fluage est la déformation continue pendant le maintien d'une charge constante, qui intervient après la déformation initiale. Dans le cas du béton, le fluage est considéré comme un phénomène se développant à long terme et il est la différence des évolutions dans le temps des déformations des bétons chargés et des bétons non chargés.

On sait depuis longtemps, que le comportement du béton sous chargement mécanique (sollicitation) nous permet de constater deux types de réponse :

- une déformation instantanée (au moment du chargement)
- une déformation différée (déformation s'ajoutant à la déformation instantanée et dont la vitesse diminue avec le temps)

Le fluage varie en fonction :

- du point de la structure où on le calcule
- de la contrainte appliquée
- de l'âge et de la durée de chargement
- des conditions environnementales (température et degré d'hygrométrie)

Le tableau suivant donne quelques paramètres influant sur le fluage.

Caractéristiques liées à La formulation du béton	Histoire de la conservation	Conception des Corps d'épreuve	Sollicitations
Types de granulats Dosage ciment Type ciment Rapport E/C Rapport G/C	Température Hygrométrie (traitement de surface)	Forme Dimension renforcement	Charge (orientation, Intensité) Histoire du chargement

Tableau 5. Paramètres influant sur le fluage d'un élément de structure en béton

6.1 Sollicitation de flexion

Le taux de chargement (servant de référence) est basé sur la charge de première fissuration du composite pour chaque type de mélange. La première fissure ne conditionne pas rapidement la rupture mais conduit à une redistribution des efforts internes. Ceci pour des bétons renforcés de fibres. L'asservissement en flèche contrôlée s'avère donc indispensable pour maîtriser la rupture au moins partiellement. L'illustration de ce propos peut être visualisé par un essai de flexion quatre points. Ce type de sollicitation sera expliqué en détail dans les prochains chapitres. [16]

6.2 Le mécanisme de fluage

Les deux mécanismes différés de fluage et de retrait modifient l'état du matériau (variation de volume, de déformation ou de contrainte) dans un laps de temps (quelques minutes à quelques années) sous sollicitations (chargement mécanique, hydrique, etc.). L'hétérogénéité ainsi que les propriétés mécaniques et physiques du béton rendent possibles ces comportements différés qui dépendent principalement de la présence de l'eau au sein du béton. Conventionnellement, le fluage correspond à l'augmentation des déformations d'un élément de structure sous charge maintenue constante au cours du temps. Les déformations de fluage sont évaluées par la différence des évolutions dans le

temps des bétons chargés et non chargés. [17] La découverte du fluage en 1910 a été révélée par Eugène Freyssinet qui l'observa sur un pont qu'il construisit à Le Veudre sur l'Allier (France) en observant une évolution des déplacements de la structure au cours du temps. En parallèle, il étudiait les méthodes de précontrainte et montra qu'elles remédiaient en partie aux déformations différées. Mais il cherchait aussi à établir des relations entre l'évolution des déformations et les propriétés des ciments et des matériaux. Ces travaux permirent de conclure que le fluage dépendait des mouvements de l'eau contenue dans le ciment et très tôt, il l'associa davantage à un retrait amplifié par l'état de contrainte qui accélérât la vitesse de déformation et par suite le départ d'eau. [18]

Il est connu depuis très longtemps, que le comportement du béton sous chargement mécanique (où sollicitation), nous a permis de constater deux types de réponse :

- Une déformation instantanée (juste au moment du chargement ou de l'application de la sollicitation),
- Une déformation différée (déformation s'ajoutant directement à la déformation instantanée, et dont la vitesse diminue avec le temps).

Ceci a été observé par le maintien d'une éprouvette sous une contrainte constante : la déformation croît dans le temps (fluage) (voir figure 3). Réciproquement, le maintien d'une déformation constante imposée, s'accompagne d'une diminution de la contrainte au cours du temps (relaxation)

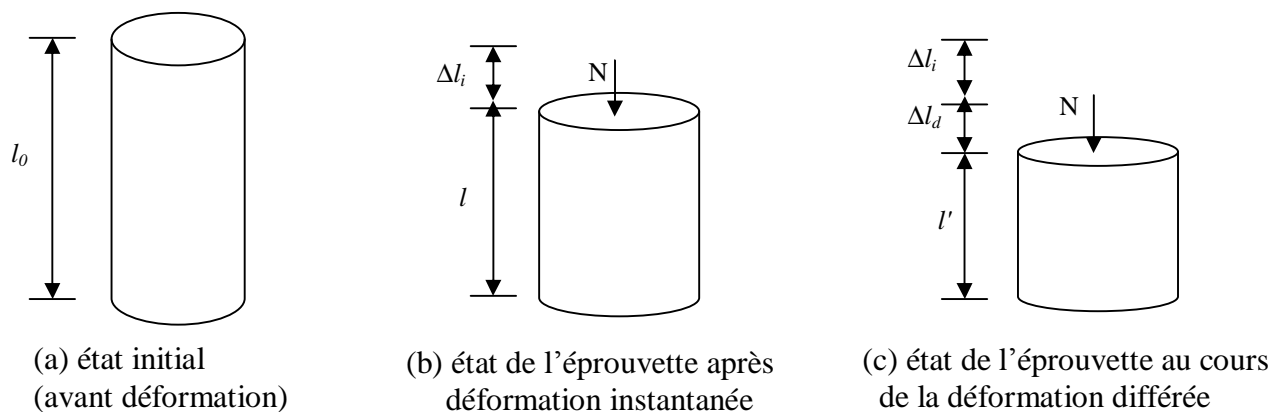


Fig. 3. Essai de compression sur une éprouvette cylindrique en béton

L'observation du comportement du matériau béton, sur des échantillons de laboratoire ou sur des ouvrages réels, montre que les déformations les plus couramment constatées ne sont pas uniquement liées à l'intensité du chargement subi mais dépendent du comportement du matériau dans le temps. En effet, le béton est un matériau en continuelle évolution, entraînant des problèmes de déformabilité et de fissuration.

Autre que le béton, de nombreux matériaux sont susceptibles de fluer, tels les métaux, généralement sous hautes températures, quelques roches lorsqu'elles sont soumises à de fortes sollicitations et les matériaux plastiques.

Le béton présente cependant deux particularités fondamentales qui le différencient des autres matériaux.

- Il est d'abord un matériau hétérogène aussi bien au niveau microscopique que macroscopique.
- C'est aussi un matériau qui se fabrique sur ou à proximité du lieu de construction. Ses caractéristiques dépendent donc fortement des paramètres de composition et d'environnement.

Sous un programme de sollicitation variable dans le temps, il y a donc interaction entre la part de la réponse qui est due aux valeurs passées de la sollicitation (comportement rhéologique héréditaire du béton), et la part qui est due aux valeurs actuelles de cette dernière. Ceci nous mène à conclure qu'une réponse est difficile à prévoir, car elle dépend de façon plus ou moins complexe, de toute l'histoire antérieure de la sollicitation. On dit que le comportement du béton est héréditaire, quand la réponse dépend de son histoire passée. Pour le béton la chronologie intervient sous deux formes : la viscoélasticité et le vieillissement.

6.2.1. Les déformations du fluage sous contraintes croissantes

La déformation de fluage se décompose suivant trois phases d'évolution (primaire, secondaire et tertiaire) qui possèdent des caractéristiques différentes en terme de déformation ε (creep strain), de vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ (creep strain rate) et d'accélération de la déformation $\ddot{\varepsilon}$ (creep strain acceleration). [19] La mise en évidence des trois évolutions est possible par un test de fluage maintenant un niveau de charge élevé et constant, après une montée en charge rapide (instantanée). (Fig. 4(a))

Le plus souvent, l'état de contrainte global au sein d'une structure, reste relativement faible et n'engendre que les phases de fluage primaire et secondaire. Les déformations de fluage sont alors approximativement deux à trois fois plus importantes que la déformation instantanée. [20] Dans cette gamme de contraintes, le mécanisme de fluage a tendance à modifier le matériau en le compactant (fig.4 (b)) [21]; ce qui lui confère un gain de résistance.

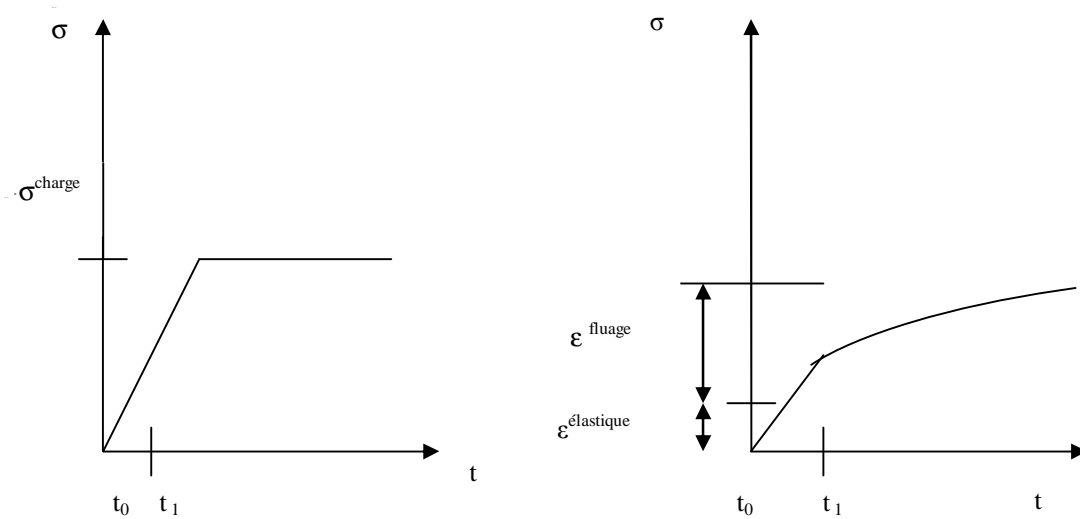


Figure 4. (a) Test mécanique de fluage

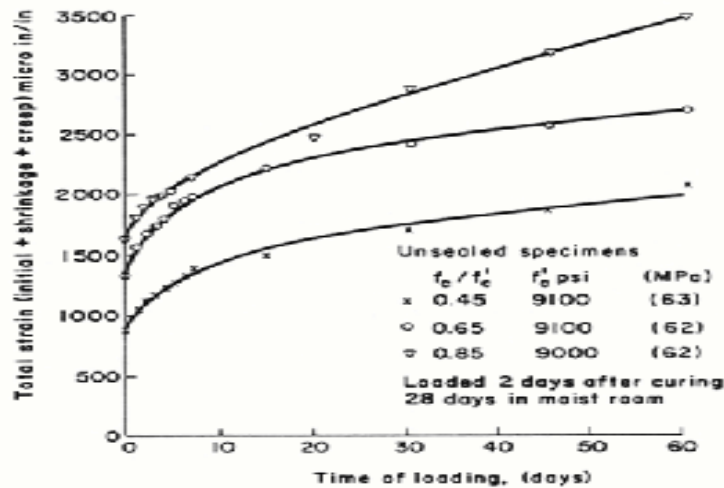


Figure 4. (b). Déformations de fluage primaire et secondaire. [22]

La déformation de fluage complète, c'est-à-dire, avec ses trois phases (primaire, secondaire, tertiaire) n'est observée que lorsque le palier de contrainte est établi pour des niveaux proches de la résistance. (Figure 5 (a)) [23] [24]

Quelque soit la phase enclenchée, on remarque que la vitesse de déformation reste toujours positive. En revanche, pour ces trois phases de fluage, différentes accélérations de la déformation ε sont identifiées :

- phase primaire : l'accélération est négative et influence la déformation se stabiliser
- phase secondaire : l'accélération oscille autour d'une valeur nulle $\varepsilon'' \rightarrow 0$, entraînant une évolution de la déformation à vitesse constante
- phase tertiaire : l'accélération devient positive $\varepsilon'' > 0$. La déformation augmente rapidement en générant la rupture du matériau.

On observe que les forts niveaux de contrainte génèrent une fissuration du matériau dont la progression modifie de manière significative la déformation de fluage et notamment dans sa dernière phase (80% de déformation en plus par rapport à la valeur de déformation de fluage secondaire). [25] [26] L'accélération positive dans cette ultime phase s'associe à un mécanisme de déformations dilatantes du béton par croissance rapide de la micro fissuration. [27]

Les travaux de BERES [21] confirment cette ultime cinétique de déformation par la représentation du coefficient de fluage $\varphi(t', t)$ défini à partir de la déformation totale $\varepsilon_{\text{tot}}(t)$ (au temps t , à l'observation) et de la déformation instantanée $\varepsilon(t')$ (au temps t' , au chargement) (figure 5 (b)). A un niveau de contrainte proche de la rupture, la bifurcation de $\varphi(t', t)$ indique le seuil de non linéarité qui varie en fonction de la résistance du béton. [25] L'observation du coefficient de Poisson dans la phase de fluage fournit une indication intéressante de la valeur de ce seuil. Lorsqu'il vaut $\nu = 0.5$, le niveau de contrainte est suffisamment élevé pour initier des zones de fissure au sein de la pâte de ciment. Pour un béton, la présence de granulats semble différer, voire arrêter ces premières fissures à l'interface « pâte de ciment – granulats ». Dans le cas d'une pâte de ciment, cette barrière à l'ouverture de fissure est inexistante et la fissuration se propage plus rapidement en générant la perte de cohésion matérielle et l'instabilité de l'élément. [28]

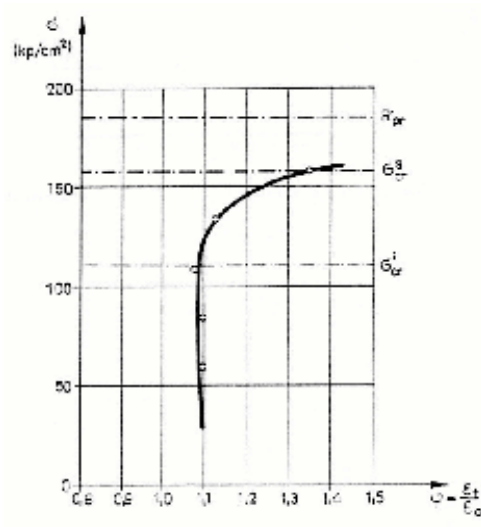
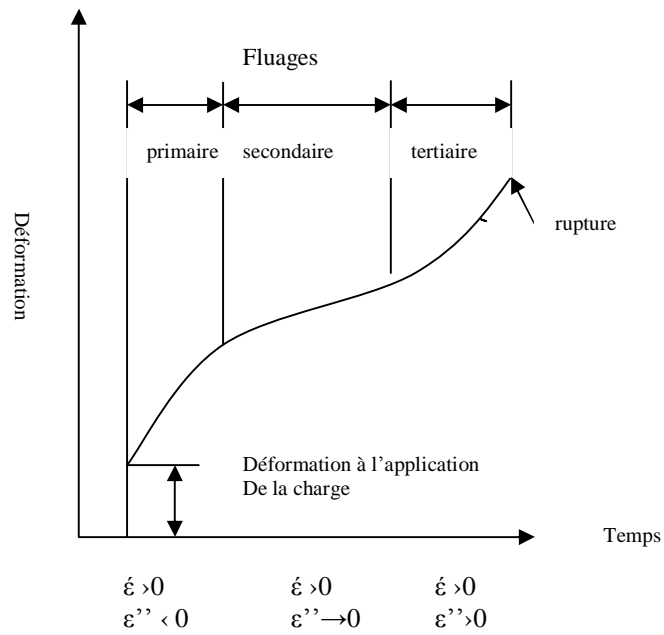


Figure 5. (a) Evolution de la déformation de fluage complète. [29] (b) Variation du coefficient de fluage $\phi(t, t')$ en fonction du niveau de contrainte. [21]

6.2.2 Définition de la fonction de fluage.

La fonction de fluage $J(t, t')$ est définie comme la déformation produite sous charge en fonction du temps $\varepsilon_c(t)$ par unité de contrainte (éq.2). Sa représentation sert à montrer la linéarité ou non des résultats expérimentaux de tests de fluage. [17] D'autres formes de fonction sont équivalentes à la fonction de fluage (éq.3). Elles sont malgré tout moins adaptées avec $C(t, t')$, le fluage spécifique ou $\varphi(t, t')$, le coefficient de fluage car ces fonctions dépendent de la valeur de la raideur du matériau déterminée au début du chargement $E(t')$ et ne tiennent pas compte de l'évolution de la raideur au cours du chargement. Leur validité à court terme ne l'est pas à long terme. [30] Par exemple, la représentation du fluage spécifique $C(t, t')$ induit un manque de précision vis-à-vis de la déformation $\varepsilon_c(t)$.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_0(t) = \int J(t, \tau) d\sigma(\tau) \quad (\text{éq.1})$$

Avec : $\varepsilon_0(t)$, les déformations libres (retrait, déformations thermiques, etc.)

$$\varepsilon_c(t) = \int J(t, t') \sigma(t') dt' \quad (\text{éq.2})$$

$$J(t, t') = 1/E(t') + C(t, t') = 1 + \varphi(t, t')/E(t') \quad (\text{éq.3})$$

$$\varepsilon_{fl}(t) = \varepsilon_c(t) - \varepsilon_c(t') \quad (\text{éq.4})$$

Avec : $\varepsilon_c(t')$: la déformation produite par le chargement instantané au temps t' .

6.2.3 Comparaison fluage en traction / fluage en compression

Le fluage spécifique du béton $C(t, t')$ (specific creep) possède des valeurs très proches en compression et en traction (fig.6). [31]

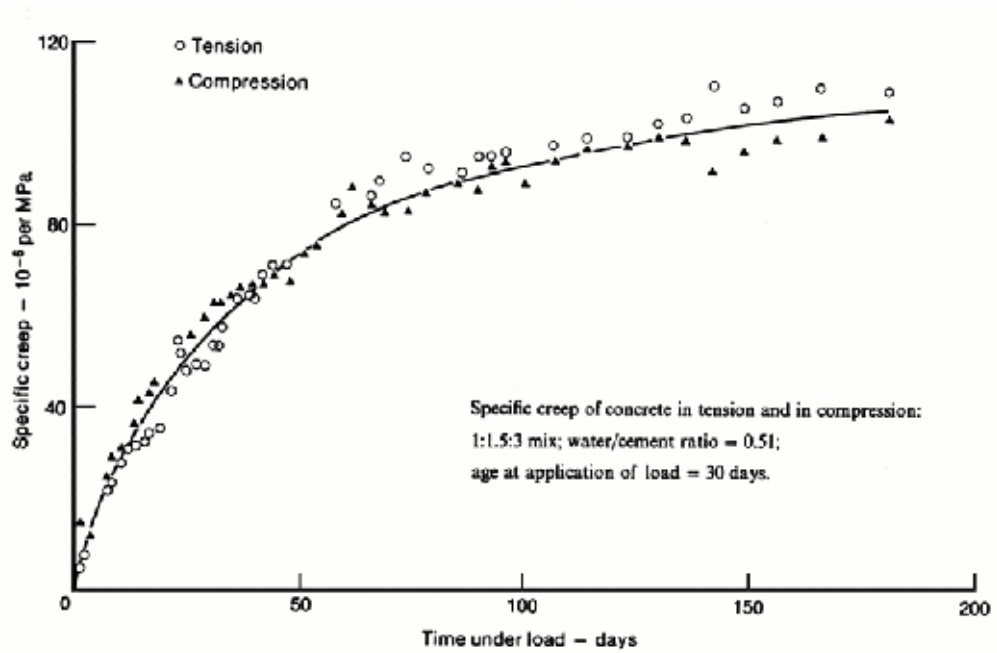


Figure 6. Fluage spécifique $C(t, t')$ en traction et compression [29]

En revanche, en terme de déformation de fluage $\varepsilon_{fl}(t)$ (éq.4), la vitesse de déformation en traction est plus rapide qu'en compression (fig.7).[29][24] L'amplitude finale des déformations en traction est pratiquement atteinte durant les premiers jours après l'application du chargement. En compression, cette évolution est nettement plus lente et progressive. A long terme, les déformations de fluage de traction et de compression tendent à se rejoindre pour obtenir des valeurs similaires.

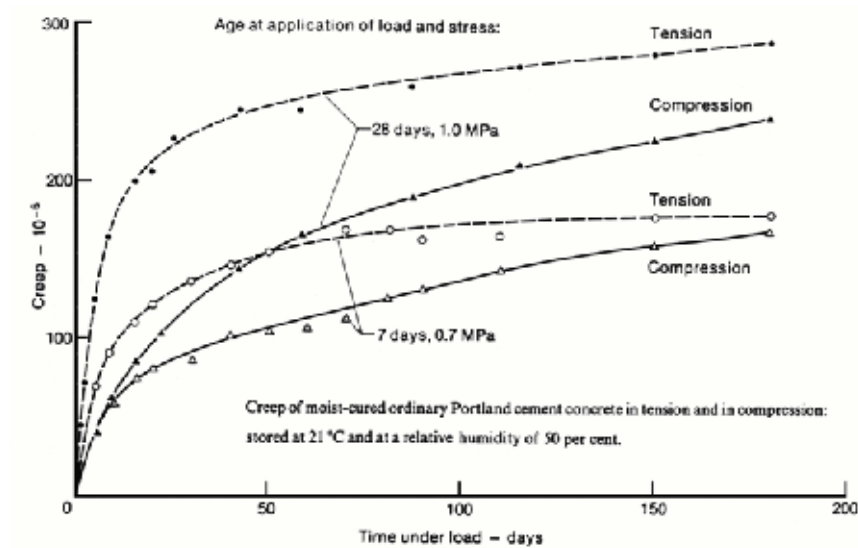


Figure 7. Déformations de fluage en traction et compression à différents âges. [29]

6.2.4 Influence du type de chargement

La cinétique de déformation de fluage présente des différences, selon si on maintient constante une charge ou une contrainte. Principalement, un écart visible sur la valeur de la vitesse de déformation de la phase de fluage secondaire est constaté. Les phases de fluage primaire et tertiaire restent peu sensibles à la distinction de contrainte constante ou de charge constante. [32]

6.2.5 Influence de l'eau

Le mécanisme de fluage dépend de l'état hydrique du béton. Les mouvements de l'eau au sein du matériau lors des processus de séchage ou d'hydratation, ainsi que la température sont des facteurs de variation des déformations de fluage.

L'eau est un facteur de déformation du béton. [33] Les bétons fortement dosés en eau fluent davantage car ils deviennent aussi plus poreux à maturité. [25] La pâte de ciment possède des capillaires de plus grande taille, permettant de retenir une plus grande quantité

d'eau. Jusqu'à maturité, la déformation sous chargement se produit simultanément avec le processus d'hydratation du ciment. Ces deux mécanismes évoluent en interaction jusqu'à l'apparition des silicates anhydres par l'hydratation et le durcissement de la micro structure. Le caractère aléatoire du mûrissement du béton implique une répartition non homogène de la teneur en eau dans l'élément jusqu'à l'équilibre. [34] [35] Par conséquent, la cinétique de fluage ; par sa dépendance vis-à-vis de l'état hydrique, est modifiée et conduit au développement de déformations différées d'amplitude variable. [36] Après durcissement du béton, la déformation de fluage évolue au travers d'un matériau plus stable. A l'état mature du matériau, les mouvements de l'eau accélèrent l'évolution de la déformation. Ils ont imputés aux déformations de fluage, en particulier sous contraintes du domaine linéaire de comportement. La cinétique de propagation demeure relativement lente dans cette gamme de sollicitation [37], même si à l'échelle micro structurale, les échanges hydriques s'exécutent avec une vitesse de diffusion de l'eau à travers les pores, qui semble extrêmement rapide. [34]

6.2.6 Influence du rapport E/C

On constate que le rapport E/C au très jeune âge (âge où l'hydratation est peu avancée) n'influence pas vraiment les déformations de fluage. [31] Après quelques jours d'âge du béton, à rapport E/C croissant, il constitue un facteur d'affaiblissement de la résistance en traction et d'accroissement du fluage spécifique. [38] Les bétons à fort ratio E/C contiennent un pourcentage élevé de pores et possèdent donc une capacité de rétention importante de l'eau dans le béton. Or plus la teneur en eau (évaporable) est importante, plus les déformations de fluage en compression comme en traction (fluage propre en particulier) vont croître.[25] [36] Cette amplitude dépend aussi de la qualité du ciment et de la quantité effective du béton. [24] [31] A ratio E/C constant, par exemple, on note une légère diminution des déformations avec un plus fort dosage en ciment. [39] A l'inverse, à quantité d'eau équivalente mais pour des dosages en ciment plus faibles, les déformations de fluage augmentent.

6.2.7 Influence des granulats

La fonction des granulats vis-à-vis du fluage est de restreindre les déplacements de la pâte de ciment. [25] [40] Leur taille et leur qualité sont particulièrement influentes sur l'état de déformation et de fissuration. L'augmentation de la taille des granulats améliore la raideur du matériau en réduisant la capacité de déformation. [41] Une granulométrie plus étalée (représentation de la gamme des poudres, en particulier) permet d'augmenter d'autant plus la raideur mais aussi la résistance. A l'opposé, les granulats grossiers bloquent la déformation du liant, l'initiation de fissures et la vitesse de séchage. Leur rigidité étant très grande devant celle de la pâte de ciment, ils vont constituer une part importante de la raideur du matériau. [42] Pour exemple, le béton de sable développe des déformations de fluage deux fois plus larges que le béton de granulats. [43]

6.2.8 Influence des ajouts

Les plastifiants et super plastifiants fluidifient la pâte de ciment en augmentant les forces répulsives entre les particules. [44] Cette action engendre un phénomène de dilatance qui se produit à partir du moment où les grains n'exercent aucune force de liaison entre eux. Leur déplacement ne se justifie que par la charge soumise à la pesanteur. D'un point de vue de la composition, ces ajouts permettent de réduire la quantité d'eau de la composition du béton. Leurs conséquences sur l'évolution des déformations de fluage furent observées à ratio E/C constant sur des essais menés par BROOKS [45] qui conclut que ces additifs augmentent les déformations de fluage total d'environ 20% et que l'amplitude est deux fois plus importante pour les déformations de fluage propre. Le retrait global est également supérieur.

6.3 Etude de l'influence des fibres métalliques sur le retrait du béton

Les paramètres d'un béton subissent constamment des modifications au cours de sa durée de vie. L'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant les résistances mécaniques et les modules de déformation. Suivant l'état de conservation, le

milieu extérieur, la température, les charges appliquées, le béton sera le siège de transformations diverses :

- variations dimensionnelles (retrait, gonflement)
- fluage sous charge instantanée

Ces variations peuvent avoir lieu simultanément ou successivement et combiner leurs effets.

On peut dire que :

- les bétons de fibres se stabilisent plus rapidement que les bétons sans fibres
- les déformations du retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles du béton normal
- la forme et la quantité des fibres semblent être les facteurs les plus importants qui gouvernent le retrait. [46] [47] [48]. Les fibres courtes sont plus efficaces contre le retrait. [49]
- le béton de fibres aurait une structure de matrice contenant plus de capillaires saturés en eau, et par contre des pores contenant moins d'eau. Ceci serait la cause principale du retrait différentiel observé entre témoin et composite.
- L'action mécanique des fibres sur le retrait est faible
- Les capillaires saturés se positionnent à l'interface fibre – matrice, la surface développée des fibres intervient et fait que plus elle est importante plus le retrait augmente.
- Les fibres accélèrent un peu le départ de l'eau, le retrait des mortiers est diminué, cela est vérifié pour le retrait après 24 heures.
- Le retrait du béton de fibres diminue en fonction du temps. [50][51]

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la description du matériau béton de fibres et ses différentes réponses aux comportements mécaniques et différés et à leurs mécanismes. L'étude bibliographique a mis en évidence que le béton était un matériau fragile et que la dégradation de celui-ci était liée à des processus de fissuration. Le mécanisme du fluage est apparu comme étant un phénomène complexe de par le nombre important de paramètres à considérer.

L'intérêt croissant pour les nouveaux bétons et leur utilisation dans beaucoup de domaines du génie civil, a fait que nous avons voulu apporter une nouvelle approche pour la conception d'un nouveau produit consistant en un béton renforcé de fibres métalliques recyclées ; ces copeaux se trouvant être des déchets de l'industrie locale. Pour améliorer les solutions technologiques existantes en termes de volume, de poids et de résistance, nous devons réaliser une fiche technique de ces bétons en les caractérisant. Ceci nous permettra de procéder à une étude comparative entre un béton sans fibres, un béton renforcé de fibres commercialisées et un béton renforcé de fibres métalliques issues d'opérations d'usinage. La démarche consiste à développer une étude expérimentale qui permettra de relier les propriétés mécaniques du matériau à son comportement sous sollicitations monotones et différées.

REFERENCES**[1] NEVILLE A. M.**

« Propriétés des bétons. » Paris. Eyrolles. 806 pages.

[2] WITTMANN F. H.

« Propriétés de la pâte de ciment durcie. » Septième congrès international de la chimie des ciments : rapports principaux, Paris. 1980, Vol. I, Sous thème VI-2, 16 pages

[3] BERRA M., CASTELLANI A.

« Toughness of old plain concretes. » In : Wittmann Eds. Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS – 2, Zurich. Freiburg: Aedificato publishers. 1995, Vol. I, p. 85 – 94.

[4] ARABI N.

« Contribution à l'étude du comportement mécanique du composite ciment verre et durabilité des fibres de verre. » thèse doctorat Université de Annaba 2006. 191 pages.

[5] MINART J. HOANG L.H. & TACHE G.

« Le béton de fibres. » Rapport bibliographique. Paris. Centre d'étude du bâtiment et des travaux publics.

[6] SHAH S.P., RANGAN B.V.

« Fibre reinforced concrete properties. ACI Journal. February 1971. p. 126-135.

[7] CASANOVA P.

« Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau. » Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts Chaussées. 1995.

[8] ROSSI P., HARROUCHE N., BELLOC A.

« Méthode de composition des bétons de fibres métalliques. » Annales ITBTP, n°475. Juin – Juillet 1989. Série : BETON 266.

[9] BARON J., LESAGE R.

« La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier. » Rapport de recherche LPC, LCPC, Paris, n° 64, Décembre 1976.

[10] ROSSI P.

« Les bétons de fibres métalliques. » Presses de l'ENPC. Juin 1998

[11] DUVAL 1992

« La durabilité des armatures et du béton d'enrobage ; » dans : la durabilité des bétons sous la direction de J. BARON et J.P. OLLIVIER. Presses des ponts et chaussées. 1992.

[12] DUBOIS ET NOUGUIER

« Durability of steel fibrous concrete used for the manufacture of containers for nuclear waste storage. » In: Fibre Reinforced Cements and Concrete. Recent developments. R.N SWAMY ed. Elsevier Applied Science, 1989, p 573-581.

[13] AKER P.

« Comportement mécanique des bétons : apports de l'approche physico – chimique. » Rapport de recherche de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.1988. n° 152, 121 pages.

[14] BERTHOLLET A.

« Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité : interaction des déformations du fluage et du comportement non linéaire du matériau. » Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 29 Octobre 2003.

[15] BENBOUDJEMA F.

« Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Applications aux enceintes de confinement de bâtiments de réacteurs de centrales nucléaires. ».2002 Université de Marne La Vallée. UFR des sciences et technologies, 258 pages.

[16] GERARD B., MARCHAND J.

«"Influence of cracking on the diffusion properties of cement based materials. Part I : Influence of continuous cracks on the steady-state regime." Cement and Concrete Research 30 p. 37-43.

[17] COQUILLAT G.

“ Mesures fondamentales sur éprouvettes: définition et méthodes expérimentales.”Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. 1987, n°455, série : BETON 248, P.82-88.

[18] FREYSSINET E.

“Relation entre les déformations et la constitution des ciments et des matériaux de structure colloïdaux (1926 – 1929) : idées et voies nouvelles. » Science et industrie. 1933, n° 1.

[19] POH W.

“ General creep-time equation.” Journal of Materials in Civil Engineering. 1998, Vol.10,n°2 p.118-120.

[20] ACKER P., EYMARD R. , PIAU J.M

« Structural analysis of concrete structures : accounting for thermal and hygral effects. . »
Annales des Ponts et Chaussées 1991, p.1-11. »

[21] BERES L.

« La macro structure et le comportement du béton sous l'effet de sollicitation de longues durées. » Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 1969, Vol.2, n°8, p.103-110.

[22] NGAB A.S, NILSON A.H. , SLATE F.O

“Shrinkage and creep of high strength.” A.C.I Journal. 1981, Vol. 78, n°4, p.255-261.

[23] CHEN Z., WANG M.L.

“A partitioned- solution method with moving boundaries for nonlocal creep damage of concrete.” Creep and shrinkage of concrete proceedings of the fifth international RILEM Symposium, Barcelona – London: E & Fn Spon, 1993, p.393-398.

[24] BISSONNETTE B., PIGEON M.

«Le comportement visco-élastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations. » Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 2000, Vol.33, p.108-118.

[25] SMADI M.M. , SLATE F.O, NILSON A.H.

« Shrinkage and creep of high , medium, and low – strength concretes , including overloads.” ACI Materials Journal, 1987, Vol.84, n°3, p.224-234.

[26] GETTU R. , GARCIA - ALVAREZ V.O .

« Interaction of creep and fracture in concrete.” Creep and shrinkage of concrete proceedings of the fifth international RILEM Symposium, Barcelona – London : E & Fn Spon, 1993, p. 413-420.

[27] BOUKHAROV G.N., CHANDA M.W., BOUKHAROV N.G.

“The three processes of brittle crystalline rock creep.” International Journal of Rock Mechanic. Mining science and geomechanics. 1995, Vol.32, n°4, p.325-335.

[28] LOO Y.H., TAM C.T., ZHONG H.

“Variation of differential strain ratio in normal- and high- strength concrete under short-term uniaxial compression.” Magazine of concrete research, 1994, Vol.46, n°169, p.245 – 256.

[29] NEVILLE A.M., DILGER W.H., BROOKES J.J.

“Creep of plain and structure concrete.” London: Construction Press.1983, 361 pages.

[30] BAZANT Z.P.

“Mathematical modelling of creep and shrinkage of concrete.” Chapter 2, Material Models for Structural Analysis. In: Bazant Eds – UK: & John Wiley & Sons, Ltd. 1988, p.99-215.

[31] BISSONNETTE B., PIGEON M.

“Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes.” Cement and Concrete research. 1995, Vol.25, n°5, p. 1075-1085.

[32] LUKAS P., CADEK J., SUSTEK V., KUNZ L.

“Creep of CMSX – 4 single crystals of different orientations in tension and compression.” Materials science & Engineering A. Structural Materials: properties, microstructure and processing. 1996, Vol. 208, n°2, p. 337-342.

[33] NEVILLE A.M.

“Current problems regarding concrete under sustained loading.” Proceeding International Association for Bridge and Structural Engineering. 1966, Vol. 26, p.337 – 343.

[34] BAZANT Z.P., CHERN J.C.

“Concrete creep at variable humidity: constitutive law and mechanism.” Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 1985, Vol. 18, n°103, p. 1-20.

[35] BAZANT Z.P., XI Y., BAWEJA S.

“Preliminary guidelines and recommendation for characterizing creep and shrinkage in structural design codes.” Creep and shrinkage of concrete proceeding of the fifth International RILEM Symposium. , Barcelona – London: E & Fn Spon, 1993, p. 805-829.

[36] KOVLER K.

« Interdependence of creep and shrinkage concrete for concrete under tension.” Journal of Materials in Civil Engineering. 1995, Vol.7, n° 2, p. 96 – 101.

[37] SYMPOSIUM RILEM 68 (1969)

Final report and conclusions: session 6. Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 1969, Vol.2, n°8, p. 149 – 162.

[38] OSTERGAARD L., LANGE D.A., ALTOUBAT S.A., STANG H.

“Tensile basic creep of early-age concrete under constant load.” Cement and Concrete Research. 2001. Vol.31, n°12, p. 1895 – 1899.

[39] L'HERMITE R.G.

“Quelques compléments à l'étude expérimentale du fluage du béton en compression simple. » Annales de l'ITBTP. 1978, Série BETON 179, n°373, p. 17 -20.

[40] KHAN A.A., COOK W.D., MITCHELL D.

“Creep, shrinkage and thermal strains in normal medium and high-strength concretes during hydration. ACI Materials Journal.1997, Vol.94, n°2, p. 156 – 163.

[41] HARSH S., SHEN Z., DARWIN D.

“Strain – rate sensitive behaviour of cement paste and mortar in compression.” ACI Materials Journal.1990, Vol.87, n°5, p. 508 – 516.

[42] Mc CREATH D.R., NEWMAN J.B., NEWMAN K.

“The influence of aggregate particles on local strain distribution and fracture mechanism of cement paste during drying shrinkage and loading to failure.” Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 1969, Vol.2, p.73 – 84.

[43] BENAÏSSA A., MORLIER P., VIGUIER C.

« Fluage et retrait du béton de sable. » Matériaux et Constructions / Materials and Structures. 1993, Vol.26, p.333 – 339.

[44] BOMBLED J.P.

« Recherches sur les propriétés rhéologiques des suspensions minérales concentrées. » Conférence du Groupe Français de Rhéologie. 1965, p. 35 – 49.

[45] BROOKS J.J

« Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete. » Magazine of Concrete Research. 1989, Vol. 41, n°148, p. 145 – 153.

[46] ROSSI P.

« Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques. » Annales de l'ITBTP, n° 492, SERIE BETON 279, 1991, p. 90 – 107.

[47] MIAO B.

« Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton. » Thèse de doctorat. ENPC 1988, 170 pages.

[48] PAILLÈRE A.M., GODART B.

« Contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement des structures en béton. » Proceedings of the first international RILEM Congress Combining Materials: design, production and properties. Chapman and Hall, 1989, Vol.2, p. 686 – 693.

[49] HUA C., ACKER P., EHRLACHER A.

« Retrait d'autodessiccation du ciment, analyse et modélisation macroscopique. » Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.1996, n° 196, p. 79 -89.

[50] GARCIA BOIVIN S.

« Retrait au jeune âge du béton : développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. » Thèse de doctorat. ENPC. Paris. 1999, 251 pages.

[51] AITCIN P.C., NEVILLE A., ACKER P.

“ Les différents types de retrait du béton.” Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées. 1998, n°215, p. 41 – 51.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Différents types de fibres.

Tableau 2. Principales caractéristiques physiques et mécaniques des fibres les plus utilisées

Tableau 3. Définition de la formulation

Tableau 4. Facteurs influents sur la durabilité

Tableau 5. Paramètres influant sur le fluage d'un élément de structure en béton

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schématisation d'un empilement bidimensionnel d'un BRFM.

Figure 2. Mécanisme de corrosion des fibres en présence de fissure, et sans pénétration des chlorures.

Figure 3. Essai de compression sur une éprouvette cylindrique en béton.

Figure 4. (a) Test mécanique de fluage.

Figure 4. (b). Déformations de fluage primaire et secondaire.

Figure 5. (a) Evolution de la déformation de fluage complète

Figure 5. (b) Variation du coefficient de fluage $\phi(t, t')$ en fonction du niveau de contrainte.

Figure 6. Fluage spécifique $C(t, t')$ en traction et compression.

Figure 7. Déformations de fluage en traction et compression à différents âges.

1. Introduction

Le concept de l'utilisation des fibres pour améliorer le comportement des matériaux de construction est vieux et intuitif (pisé ou torchis pour améliorer la résistance, argile armée de paille hachée). La nouveauté est dans l'introduction de sous produits industriels comme renfort dans une matrice cimentaire pour améliorer ses caractéristiques mécaniques. [1]

Comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues :

- la granularité ou le fuseau granulaire du squelette
- les dosages en sable, gravier, ciment, eau
- et la présence d'adjuvants (plastifiant ou fluidifiant et leur dosage)

La caractérisation des bétons renforcés de fibres métalliques (BRFM), à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai.

Cela soulève, actuellement, certaines questions à propos :

- du type du corps d'épreuve (éprouvettes classiques, poutre, plaque, poutre.)
- de la géométrie des corps d'épreuve (épaisseur, élancement.)
- du type de chargement (réparti, ponctuel) et sa vitesse
- du mode d'asservissement
- et aussi du mode d'introduction du matériau (dans le coffrage) car celui-ci est structuré, organisé, tant par les parois que par la vibration ou les procédures de mise en œuvre.

Il faut absolument caractériser les matériaux BRFM, quasi indépendamment de la structure :

- d'une part pour effectuer un choix parmi la panoplie de matériaux et de dosages en renfort proposés même si les grandeurs mesurées sont difficilement exploitables à l'état actuel pour dimensionner un ouvrage
- d'autre part, pour contrôler les matériaux mis en œuvre. En effet, il faut définir les critères de jugement permettant d'accepter ou de refuser un matériau. [2]

La caractérisation des matériaux s'est faite sur quatre types de béton :

- BSF : béton sans fibres (témoin)
- BFI50 : béton renforcé de fibres métalliques industrielles normalisées (élancement : 83,33)
- BSP50 : béton renforcé de sous produits industriels : copeaux métalliques. (élancement : 83,33)
- BSP25 : béton renforcé de sous produits industriels : copeaux métalliques. (élancement : 41,66)

Cette étude permet la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur béton frais et sur béton durci. Les différents essais faits sont :

Sur béton frais :

- air occlus
- densité
- maniabilité

Sur béton durci :

- essai de compression sur éprouvettes cylindriques 16x 32 cm
- essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm.

1.1 Pourquoi les essais à 7 jours ?

Le remplissage progressif des capillaires par les hydrates résulte de la poursuite de l'hydratation, ce qui va se traduire par une augmentation du volume solide et une diminution du volume poreux alors que le volume apparent de la pâte reste approximativement constant.

Un autre phénomène peut résulter de l'évolution de la porosité c'est la diminution de la perméabilité. La chute brutale de la perméabilité entre 0 et 5 jours est expliquée par la transformation de la structure de la pâte. En fait le réseau capillaire n'est plus continu et les amas d'hydrates forment des barrières dans celui-ci. Le degré d'hydratation nécessaire pour interrompre la continuité du réseau capillaire dépend du rapport E/C. Entre $0.4 \leq E/C \leq 0.45$, le temps nécessaire à l'interruption du réseau capillaire est de 3 à 7 jours. Ce qui explique le choix de commencer les essais à 7 jours. [3]

1.2 Propriétés mécaniques du matériau

Il est extrêmement difficile de déterminer l'apport exact des fibres par rapport à un béton conventionnel car le nombre de paramètres influents est considérable. Aussi la comparaison entre un béton traditionnel et un béton renforcé de fibres ayant la même composition présente l'inconvénient de ne pas tenir compte du fait que l'addition des fibres modifie les caractéristiques de la matrice. Si la formulation retenue est celle d'un béton classique inadaptée à la réalisation d'un béton de fibres, on obtient en introduisant les renforts un composite de mauvaise qualité présentant des problèmes de ségrégation de fibres au cours du malaxage et de la mise en place. Si au contraire, on met au point une formulation spéciale pour le béton renforcé de fibres, cela permet d'obtenir un composite de bonne qualité dont la matrice est le plus souvent un micro béton ou un mortier dont les performances obtenues ne seront plus directement comparables à celles d'un béton classique.

Même avec des formulations identiques pour les deux types de béton (avec et sans fibres), il est constaté des différences d'ouvrabilité, d'homogénéité et de teneur en air occlus qui affectent les résistances mécaniques. C'est pourquoi plusieurs auteurs dont JOHNSTON [4], SERNA ROS [5], et LUB [6] recommandent une comparaison basée sur le même dosage en ciment et la même ouvrabilité. Une telle approche est utile pour les applications pratiques car l'ouvrabilité est souvent un paramètre imposé dans la mise au point d'une formulation de béton.

1.3 Pourcentage des fibres

Les pourcentages en volume des fibres utilisés sont fonction de la composition de la matrice, du mode de mise en place utilisé et des performances recherchées. Le pourcentage volumique dans le béton varie généralement de 0.3 à 3 %. On le prendra égal à 1% pour tous les mélanges, ceci nous permet de ne pas prendre en compte l'orientation des fibres.

Dans cette étude, les caractéristiques de l'interface fibres -matrice ne sont pas prises en compte et sont supposées identiques pour les différents renforts utilisés.

2. Constituants des bétons étudiés

2.1 Fibres

Dans la bibliographie, il existe une grande variété de fibres pour le renforcement des bétons. Les fibres sont obtenues à partir de l'acier, de plastique de verre ou de matériaux naturels. Ils ont différentes formes et dimensions liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres procure au béton des propriétés spécifiques et il serait présomptueux de parler du béton de fibres en général. [7]

Pour caractériser le renfort, quatre données de base sont couramment utilisées :

- a) la nature de la fibre
- b) la forme géométrique
- c) l'élanement
- d) pourcentage volumique introduit

Dans notre travail, la nature et le pourcentage volumique restent constants pour tous les renforts, l'élanement change pour un des deux sous produits, et la forme géométrique n'est pas la même pour la fibre commercialisée.

On opte généralement pour des fibres métalliques quand on désire améliorer le comportement d'un béton de structure.

Deux types de fibres ont été sélectionnés : pour le premier type de renforts, nous avons opté pour des fibres métalliques normalisées commercialisées. Pour le deuxième type de fibres, nous avons voulu nous inscrire dans une démarche de développement durable et nous nous sommes intéressés à des « déchets » que l'on pourrait éventuellement recycler. Il semble intéressant de mettre en place un recensement de matériaux recyclables, dont on peut se servir à l'état brut (sans traitement préalable) et dans les mêmes conditions et pour les mêmes utilisations que pour des fibres industrielles. Deux variantes sont prises en considération, une fibre longue et une courte.

Nous allons comparer les résultats obtenus pour avoir des renseignements sur l'influence des fibres sur la composition, sur la résistance et sur la rupture du matériau.

2.1.2 Fibres industrielles

BFI50	
provenance	MEDAFAC
forme	Bâtonnets ondulés
longueur	50 mm
épaisseur	0.6 + 0.09 mm
Composition chimique	
Carbone	0.08 – 0.12 %
Manganèse	0.8 – 1 %
Silice	0.06%
Phosphore	0.06 – 0.08 %
Souffre	00
Allongement à la rupture	3 à 4%

Tableau 1. Fibres normalisées

La fibre MEDAFAC est un produit en acier tréfilé. Sa géométrie et ses caractéristiques techniques lui permettent d'offrir au béton une ténacité importante. Grâce à ses propriétés le MEDAFAC permet d'augmenter les résistances mécaniques du matériau. Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des effets recherchés.

Les fibres d'acier MEDAFAC sont conditionnées en carton de 40 kg.



Photo 1 : fibres industrielles FI50

2.1.3 Sous produits industriels

fibres	BSP50	BSP25
provenance	Déchets CMT Oued Hamimmime	
forme	Ressorts	
longueur	50 mm	25 mm
épaisseur	0,6 mm	0,6 mm
Composition chimique	Acier CF 45	
Carbone	0.43 – 0.49 %	
Manganèse	0.5- 0.8 %	
Silice	0.15 – 0.35 %	
Phosphore	0,025 %	
souffre	0,025 %	
Allongement à la rupture	14 %	

Tableau 2. Fibres recyclées

Ces sous produits considérés comme renforts pour notre étude proviennent de déchets d'usinage de pièces mécaniques provenant du complexe moteur et tracteur d'El Khroub (commune de Constantine). Considérant l'état actuel de développement des bétons de fibres et voulant nous inscrire dans un concept de développement durable donc d'économie, nous avons voulu exploiter ces copeaux en tant que produits recyclés. Nous pensons qu'il est important de travailler sur la valorisation de « déchets » métalliques à l'échelle régionale.



Photo 2 : copeau industriel SP50



Photo 3: copeau industriel SP25

2.2 Ciment

On a utilisé pour tous nos mélanges, un seul type de ciment. C'est un CEM II provenant de la cimenterie de Hamma Bouziane (ERC Est), norme NA442 dont l'ajout principal est le calcaire. Ses différentes propriétés chimique, minéralogique, physique et mécanique sont données dans les tableaux suivants.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	PAF
27	6.13	3.12	55.86	0.94	2.02	/	/	0.00	0.88	2.17	2.41

Tableau 3. Composition chimique du clinker

La chimie des ciments est un domaine très complexe. Nous constatons d'après le tableau 3 qu'un ciment est essentiellement composé de chaux, de silice et en proportions moindres d'oxyde de fer et d'alumine.

Eléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tricalcique	C ₃ S	56.60
Silicate bicalcique	C ₂ S	22.98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9.87
Alumino- ferrite tétra calcique	C ₄ AF	8.25

Tableau 4. Composition minéralogique du clinker (NF EN 196-2)

Temps de prise		Expansion Le Châtelier		Surface spécifique (Blaine) mm ² /g	Consistance Normale
Début	2h50mn	A chaud	2.90	3891	26.91
fin	4h06mn	à froid	1.65		

Tableau 5. Propriétés physiques du ciment

La finesse du ciment joue un rôle essentiel dans la compacité de l'empilement. A titre d'ordre de grandeur, la finesse s'exprime par la surface massique, surface développée d'un gramme de ciment, soit entre 2500 et 5000 mm² /g.

Essais	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	14,32	26,64	43,31
flexion	3,57	5,83	7,79

Tableau 6. Résistances mécaniques du ciment (MPa)

Le ciment est un paramètre important en terme de résistance qui peut varier en fonction du type (sa composition) et sa classe de résistance. Ainsi dans une démarche de formulation d'un béton, le choix judicieux d'un ciment peut permettre d'atteindre les prescriptions de résistance à court terme. [8] Notre étude se fera sur des bétons mis sous chargement à 7 jours.

2.3 Sable

C'est un sable concassé non lavé (brut) à granulométrie continue en provenance de Ain Smara (carrière HEDNA) qui est fourni en vrac et qui répond aux normes exigées pour son utilisation dans la construction. Dans la composition des bétons, il faut autant que possible pour des raisons économiques utiliser des matériaux locaux.

Analyse granulométrique		Granulats calcaires concassés	
Tamis	module	Classes granulaires	
		0/3	3/8
0.08	20	10	
0.16	23	15.5	
0.25	25	20	
0.315	26	22	
0.5	28	28	
0.63	29	32	
0.8	30	35.5	
1.25	32	45	0
2.5	35	75	5
4	37	92	38
5	38	100	54
6.3	39		85
8	40		100
10	41		
12.5	42		
16	43		
20	44		
25	45		
Module de finesse		3.1	/
Coeff. D'aplatissement		/	20%

Tableau 7. Caractéristiques géométriques du sable

La classe granulaire du sable utilisé est 0/8. La norme NF P 18-541 impose un module de finesse compris entre 1.8 et 3.2, ce qui est le cas pour notre sable dont le module de finesse est égal à 3.1. C'est donc, un sable grossier. Il faut ajouter également que la teneur en éléments fins d'un sable à béton doit être telle que le passant à 0.080 mm soit inférieur à 12%, pour notre sable, elle est égale à 10%.

Propriétés mesurées	Sable	
	0/3	3/8
Masse volumique absolue	2.76	2.62
Masse volumique apparente	1.44	1.36
Equivalent de sable (%)	78.67	/
Valeur au bleu de méthylène	0.39	/
Coefficient d'absorption	1.1	1.22

Tableau 8. Caractéristiques physiques

Propriétés mesurées	Sable 3/8
L.A (Los Angeles)	20
FD (fragmentation dynamique)	19
MD (micro Deval)	16

Tableau 9. Caractéristiques mécaniques

Propriétés mesurées	Sable 3/8
Insoluble %	1.9
Sulfates %	Traces
Carbonates %	89
Chlorures %	0.29

Tableau 10. Caractéristiques chimiques

2.4. Eau

L'eau est des ingrédients essentiels du mortier. L'eau introduite dans le mélange remplit deux fonctions essentielles :

- une fonction physique qui confère au mortier frais les propriétés rhéologiques d'un liquide
- une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc des résistances mécaniques.

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau du robinet provenant de la source Fesguia qui alimente notre laboratoire. Le tableau suivant représente les résultats de l'analyse chimique effectuée sur cette eau qui répondent aux prescriptions de la norme NF P18 404.

Echantillon	Concentration
Matières en suspension	Traces
Ca	116
Mg	36
Na	80
K	3
Cl	140
SO ₄	170
CO ₃	305
NO ₃	5
T° (C)	19
pH	7.9

Tableau 11. Composition chimique de l'eau

L'eau utilisée est faiblement agressive si on se réfère à la composition chimique déterminée, on a aussi un pH légèrement acide, un taux de magnésium assez faible, la température varie de plus ou moins cinq degrés par rapport au temps de coulage des différentes poutrelles.

2.5. Fluidifiant : MEDAPLAST SP 40

Le fluidifiant utilisé est un, haut réducteur d'eau, de nature polynaphtalène sulfoné. Par définition, les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons : moins de 5% de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau. C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement. Le tableau 12 donne les caractéristiques de l'adjuvant.

Caractéristiques	
Forme	Liquide
Couleur	Marron
pH	8.2
densité	1.22
teneur en chlore	< 1g par litre
Propriétés	
Sur béton frais	Améliore la fluidité Augmente la maniabilité Réduit l'eau de gâchage Facilite la mise en œuvre
Sur béton durci	Augmente les résistances mécaniques même à jeune âge Diminue la porosité Augmente la durabilité Diminue le retrait
dosage	0.6 à 2.5% du poids du ciment
Conditionné en bidon de 12 et 25 kg et en fût de 270 kg	
Mode d'emploi	Est introduit dans l'eau de gâchage Après que 50 à 70 % de l'eau ait été Introduit.

Tableau 12 : Fiche technique du fluidifiant [9]

Les super plastifiants sont les plus importants des adjuvants dans le sens où ils donnent accès à des catégories particulières de béton, comme les bétons à hautes performances, les bétons fluides et les bétons autoplaçants. On les utilise soit pour fluidifier un mélange, soit pour conserver une certaine maniabilité, tout en diminuant la quantité d'eau. Dans notre étude, nous l'utilisons pour garder une maniabilité à peu près constante pour tous les mélanges.

3. Techniques expérimentales

Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes en vigueur.

3.1 Mise en œuvre

3.1.1 Malaxage

La réaction entre les différents composants, est d'autant plus complète que le mélange est homogène. Trois étapes constituent le mode de fabrication des bétons renforcés de fibres.

- l'homogénéisation du mélange à sec (ciment et sable) pendant deux minutes environ à vitesse lente
- introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage, ce qui a pour but de mouiller le mélange et de faciliter la mise en place, ceci pendant deux minutes à vitesse rapide. Le fluidifiant est ajouté dans l'eau de gâchage après que 50 à 70 % de l'eau ait été introduite.
- Les fibres métalliques sont ajoutées progressivement en pluie au mélange lors de la troisième phase de malaxage à grande vitesse. Cette étape prendra deux minutes aussi.

L'homogénéisation est réalisée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 40 litres, pour les essais de formulation et de caractérisation.

3.1.2 Coulage et vibration

Le mélange préparé est mis en place par coulage et vibration. Le coulage se fait en deux temps. Le moule est rempli aux trois quarts et il est soumis à une vibration jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage. Ensuite, le moule est rempli totalement et la vibration reprend pendant une minute environ.

3.1.3 Détermination de la maniabilité

Il s'agit de déterminer le temps d'écoulement des mélanges fibrés et témoin, c'est-à-dire de définir la maniabilité des mortiers et des bétons. Il s'agit donc de mesurer le temps d'écoulement du béton soumis à une vibration. La conduite de l'essai est la suivante : on introduit le béton dans la partie la plus grande délimitée par la cloison. Le béton est mis en place en 4 couches, chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement du chronomètre. Sous l'effet de la vibration, le béton s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le béton atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le béton pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le béton sera plus fluide et plus maniable. Dans notre cas, nous avons utilisé un maniabilimètre LCL pouvant contenir une capacité de trente litres pour avoir une information plus représentative du comportement rhéologique du béton frais, surtout dans le cas de l'utilisation de fibres de 50 mm. L'essai de mesure du temps d'écoulement a été mené conformément à la norme NF 18-452 et NF P 15-437. (Norme utilisée pour le cas béton).



Photo 4. Maniabilimètre.

3.1.4 Mesure d'air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange. Il est possible d'évaluer la quantité d'air enfermée lors de remplissage d'un volume en exploitant un volume de référence cylindrique. Nous avons utilisé pour cela un aéromètre de huit litres modèle « CONTROLS ». On commence par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois. On fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'un tube dans le premier robinet. Le deuxième est ouvert. Quand l'eau commence à sortir par ce dernier, on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%. On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieure et inférieure), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre. (NF 413-2 et EN 459-2)

3.1.5 Densité

La densité des mélanges a été calculée en fonction de l'échantillon introduit dans l'appareil de mesure de l'air occlus. On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre rempli par le mélange, avant la mesure de l'air occlus. Si les poids de la chambre pleine et vide sont respectivement P et P_0 , la densité du mélange frais est égal à $d = (P - P_0) / V$; V étant le volume de la chambre inférieure de l'aéromètre.

3.2 Mode de conservation

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à $20^\circ\text{C} \pm 2$ de température pour une hygrométrie de $55\% \pm 5$. Après démoulage, elles sont conservées dans la même chambre de conservation jusqu'au moment de la réalisation des essais. Ces derniers se font à 7 jours et à 28 jours.

3.3. Résistance en compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisées et d'élancement 2 (16x32 cm ; norme NF P 18-406, NA 427). La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 KN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

Les éprouvettes (photo 5) sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa. Pour des éprouvettes de 16x32 cm, cela signifie une montée en charge de $10 \text{ KN/s} \pm 4 \text{ KN/s}$. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. [10]



Photo 5. Eprouvettes 16x32 cm

3.4. Résistance en traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions 7 x 7 x 28 cm (photo 6) ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-411 et NF 18- 41, munie d'un banc de flexion 3 points. Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 (NA 428)

Cet essai permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ (7 x 7 x 28). Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est :

$M = Pa / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est

$$f_{tj} = 3,6M / a^3$$

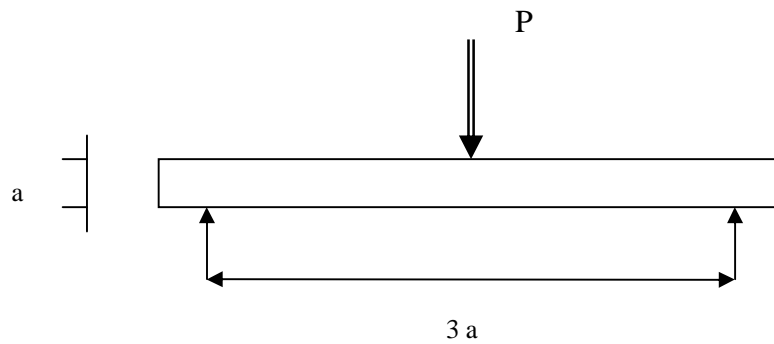


Figure 1. Essai de traction par flexion



Photo 6 : Eprouvettes 7x7x28 cm

4. Formulation

Le problème de la formulation d'un béton de fibres, se pose en termes de nouveaux constituants du béton qui sont les adjuvants organiques, les additions minérales et les fibres, et qui sont venus s'ajouter à la composition classique : eau + ciment + granulats.

Dans notre cas, il est impératif d'étudier un béton de plasticité suffisante pour assurer un enrobage correct des fibres et améliorer ainsi l'adhérence, de manière à atteindre des propriétés mécaniques élevées et un comportement du matériau satisfaisant.

Nous avons formulé les mélanges avec un critère de maniabilité identique à l'état frais. La variable qui conditionne de façon majeure les propriétés de la matrice cimentaire est le rapport E/C. Dans notre cas, la formulation à maniabilité constante est plus délicate compte tenu de l'utilisation d'un fluidifiant. Nous avons décidé de fixer le volume de pâte et de ne jouer que sur la quantité de super plastifiant pour obtenir la maniabilité recherchée.

Pour la formulation nous nous sommes fixés ce qui suit :

- le rapport E/C constant égal à 0,4
- le pourcentage de fibres constant maintenu à 1% du poids du ciment
- un temps d'écoulement au maniabilimètre compris entre 8 et 13 secondes
- un volume de fluidifiant variable suivant le mélange pour l'obtention de la maniabilité souhaitée.

Nous nous sommes inspirés de la méthode BARON-LESAGE [11] développée au laboratoire des ponts et chaussée de Paris (France) qui préconise :

- le rapport eau sur ciment (E/C) doit être fixé au préalable
- les proportions optimales en granulats ne dépendent pas de la nature et du volume du liant
- l'introduction des fibres métalliques ne modifie pas les deux premières hypothèses.
- La maniabilité souhaitée

La méthode est basée sur les hypothèses précitées et largement vérifiées par l'expérience.

ROSSI, HARROUCHE et BELLOC [12] aboutissent, en utilisant cette méthode, aux conclusions suivantes :

- la composition des bétons de fibres métalliques est totalement différente de celle d'un béton courant, ce qui traduit le fait qu'un composite fibré ne s'obtient pas en introduisant simplement des fibres dans une matrice donnée.
- Du point de vue de la maniabilité et de la compacité, les fibres métalliques jouent un rôle similaire aux gros gravillons
- La méthode de composition conduit à des bétons contenant beaucoup de pâte de ciment, ce qui est très bénéfique vis-à-vis de l'adhérence entre les fibres et la matrice.

Notre étude met en exergue la comparaison des résultats de la caractérisation des matrices cimentaires sans fibres, avec fibres industrielles et copeaux métalliques.

5. Composition

Tous les constituants entrant dans la composition des bétons sont des produits locaux, c'est-à-dire disponibles dans la région de Constantine. La composition diffère d'un béton à l'autre en fonction du type de renfort utilisé et du volume de fluidifiant introduit.

On a pris comme composition de référence, celle utilisée dans les travaux de HOUARI. [13] La recherche s'est effectuée sur le comportement monotone (statique) et sur le comportement différé (fluage) des bétons renforcés de fibres métalliques,

Il est difficile de fabriquer des éprouvettes sans avoir une orientation préférentielle des fibres mais dans le cas de faibles pourcentages comme le nôtre (de 1 à 2%), cela n'influe pas sur la maniabilité des mélanges.

Donc on obtient :

	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Ciment (kg)	662			
Sable (kg)	1327			
Eau (kg)	278			
E/C	0.42			
Fibres : 1% (kg)	6.62			
Fluidifiant (g)	00	52.96	13.24	45

Tableau 13 : composition du béton utilisé (pour 1 m³)

6. Programme expérimental.

Le programme expérimental pour les différents essais de caractérisation a été établi pour les quatre types de mélanges (BSF, BFI50, BSP50 et BSP25). Les tableaux suivants donnent l'ensemble des essais effectués sur béton frais et sur béton durci.

Réf.	Mélanges	Types d'essais	Appareils	Nombre de gâchées
1	BSF	maniabilité	Maniabilimètre	3 x 4
2	BFI50			
3	BSP50			
4	BSP25			
5	BSF	Air occlus	aéromètre	3 x 4
6	BFI50			
7	BSP50			
8	BSP25			
9	BSF	densité	sans	3 x 4
10	BFI50			
11	BSP50			
12	BSP25			

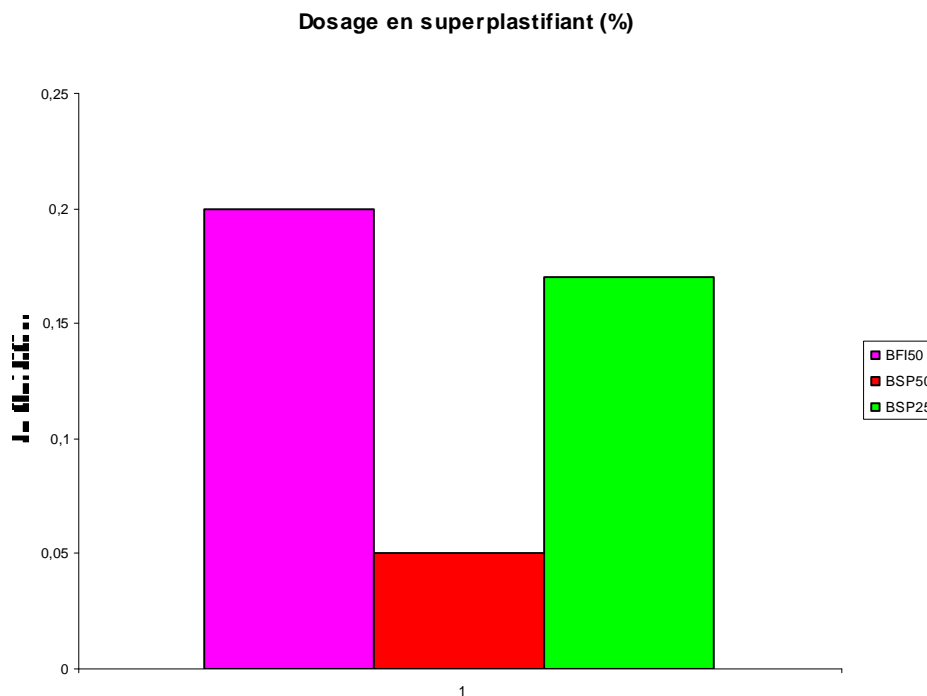
Tableau 14. Essais de caractérisation sur bétons frais.

Réf	Type de bétons	Nombre d'éprouvettes	Corps d'épreuve	Conservation T (C°),HR (%)	Age de chargement	Types d'essais	régulation
1	BSF	3x 4 x 4	16 x 32	20 °C ± 2 55 % ± 5	7 jours 28 jours	compression	force
2	BFI50						
3	BSP50						
4	BSP25						
5	BSF		7 x 7 x 28			traction	force
6	BFI50						
7	BSP50						
8	BSP25						

Tableau 15. Essais de caractérisation sur bétons durcis

7. Résultats et discussions

7.1 Analyse des différents mélanges à l'état frais



Histogramme 1. Influence de la nature des fibres sur leur dosage en superplastifiant à maniabilité constante

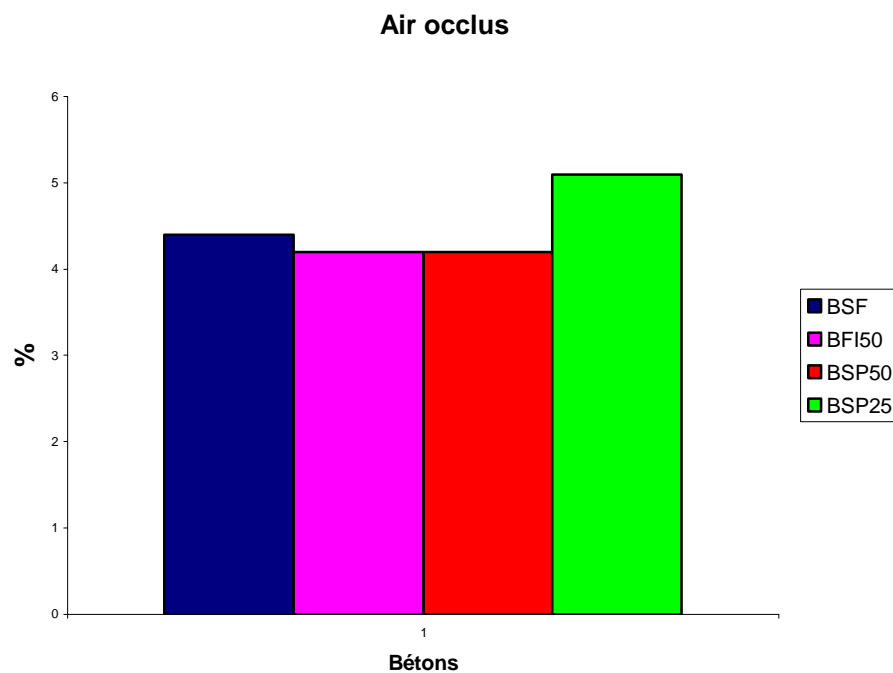
On s'aperçoit que les fibres diminuent la maniabilité d'un béton et c'est pour cela que l'ajout d'un super plastifiant est nécessaire. Les résultats obtenus donnant le temps d'écoulement montre que quelque soit la nature et la géométrie des fibres, nous obtenons un béton de maniabilité attendue (entre 8 et 13 secondes).

On observe que la fibre SP50 consomme moins d'adjuvant que les deux autres fibres (FI50 et SP50). Son maintien à l'état plastique est plus important.

On constate une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'incorporation des fibres. Une diminution rapide de l'ouvrabilité est également constatée avec l'augmentation de l'élanement l/d de la fibre SP50 incorporée. Plusieurs études ont montré que les essais statiques (flow test, essai de compactage) sont inadaptés pour la mise en œuvre du béton de fibres, et qu'il faut recourir aux essais dynamiques qui sont des essais faisant intervenir la vibration.

L'introduction des fibres distribuées uniformément dans les matériaux à base de ciment cause des problèmes d'ouvrabilité, on assiste à une diminution de la maniabilité.

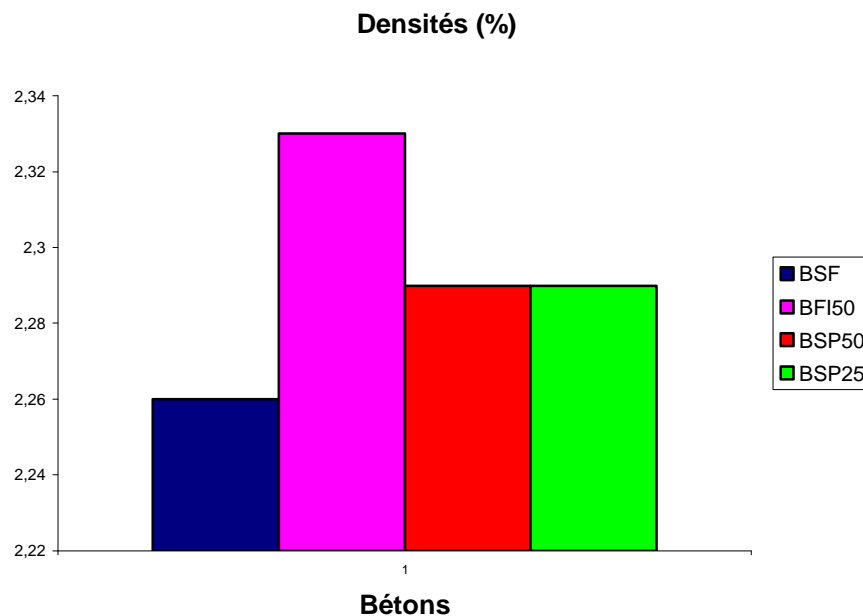
L'utilisation du maniabilimètre nous a permis de mettre en évidence l'influence des fibres sur l'écoulement du béton frais, c'est l'appareil le plus indiqué pour l'étude du béton de fibres.



Histogramme 2. Mesure de l'air occlus des différents mélanges.

Plus le béton est maniable, dans la mesure où sa compacité a été optimisée, plus le dosage en air occlus diminue. On constate que le pourcentage d'air occlus est pratiquement le même pour tous les bétons testés sauf pour le BSP25. Ceci s'explique par la forme et la

dimension des renforts utilisés (ressort avec l'élancement le plus faible), lesquels augmentent les vides à l'intérieur de la matrice, d'où l'intérêt de procéder à une étude de la microstructure. Dans ce cas, l'air qui est entraîné pendant le malaxage, a plus de difficulté à s'échapper du matériau en place. L'air contribue en général à améliorer la stabilité du matériau car on observe que l'eau qui remonte à la surface peut être piégée dans ses bulles. Il améliore la maniabilité également mais diminue la résistance à la compression. [14]



Histogramme 3. Mesure de la densité des différents mélanges

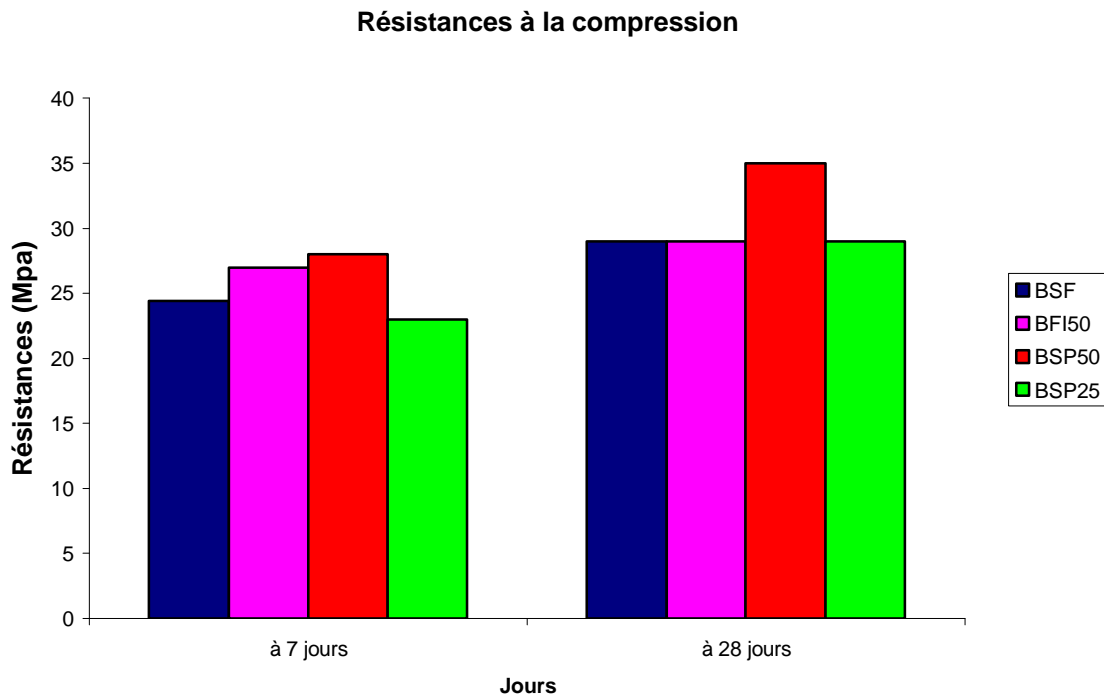
La densité du béton la plus importante est celle correspondant à la matrice renforcée de fibres industrielles, ce qui est logique vu le nombre et la forme des renforts introduits. Ce sont les éprouvettes qui pèsent le plus lourd.

7.2 Analyse des différents mélanges à l'état durci

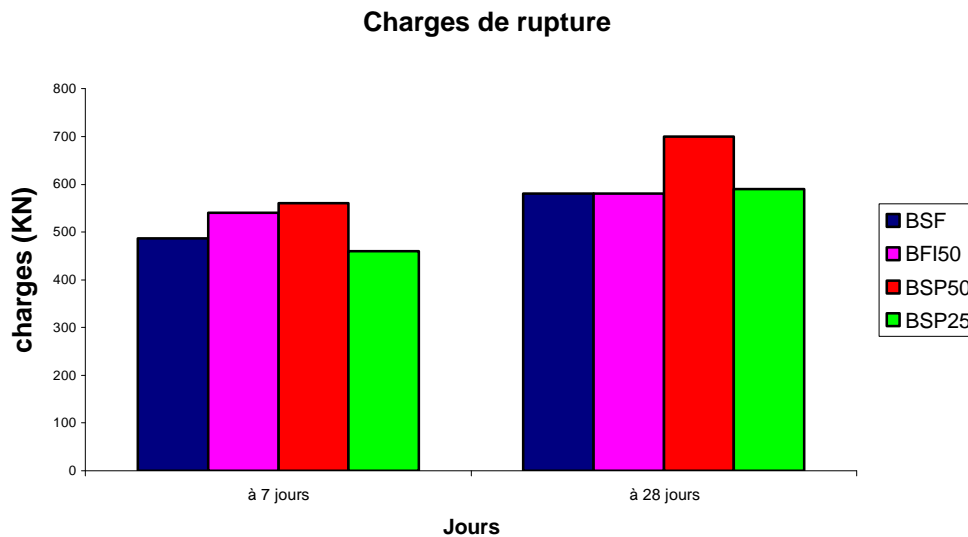
7.2.1 Résistances à la compression

bétons	Résistances à la compression (N/mm ²)		Charges de rupture (KN)	
	A 7 jours	A 28 jours	A 7 jours	A 28 jours
BSF	24.43	29	486.5	580
BFI50	27	29	540	580
BSP50	28	35	560	700
BSPP25	23	29	460	590

Tableau 16. Essais à la compression .Eprouvettes 16x32 cm



Histogramme 4. Résistance à la compression



Histogramme 5. Charges de rupture à la compression.

La résistance à la compression telle qu'elle est définie dans un essai simple à l'écrasement sur cylindre, est sensiblement la même que celle du béton sans fibres. Toutefois, on n'observe qu'un éclatement très limité du béton. Par contre la rupture se produit brutalement par élargissement rapide, sans avertissement, d'une fissure pour les mélanges sans fibres.

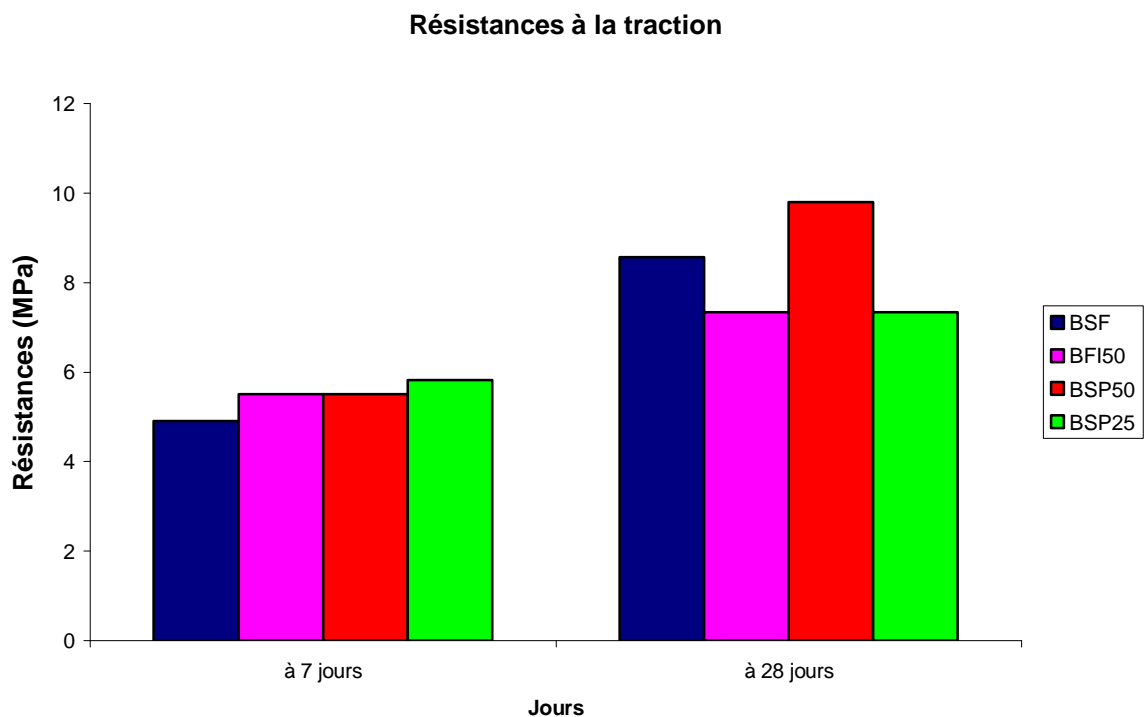
Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration sensible en compression. Ce résultat est en grande partie dû à une mauvaise compacité liée à l'incorporation de fibres dans les bétons. Pour les résistances à la compression, les résultats indiquent que les fibres industrielles ont une augmentation très peu importante. On relèvera cependant que la forme des fibres joue un rôle certain dans la résistance du béton. En effet, on remarquera que la ductilité est améliorée pour les renforts en forme de ressorts puisque la charge de rupture à 28 jours augmente de 1.25 % pour les BSP50 et de 1.28% pour les BSP25, alors que les BFI50 montrent une certaine fragilité puisque la charge de rupture n'augmente que de 40 KN. D'après ROSSI [15], les fibres

longues ont toujours des résistances à la compression inférieures à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente. Cela confirme les résultats obtenus pour les BFI50.

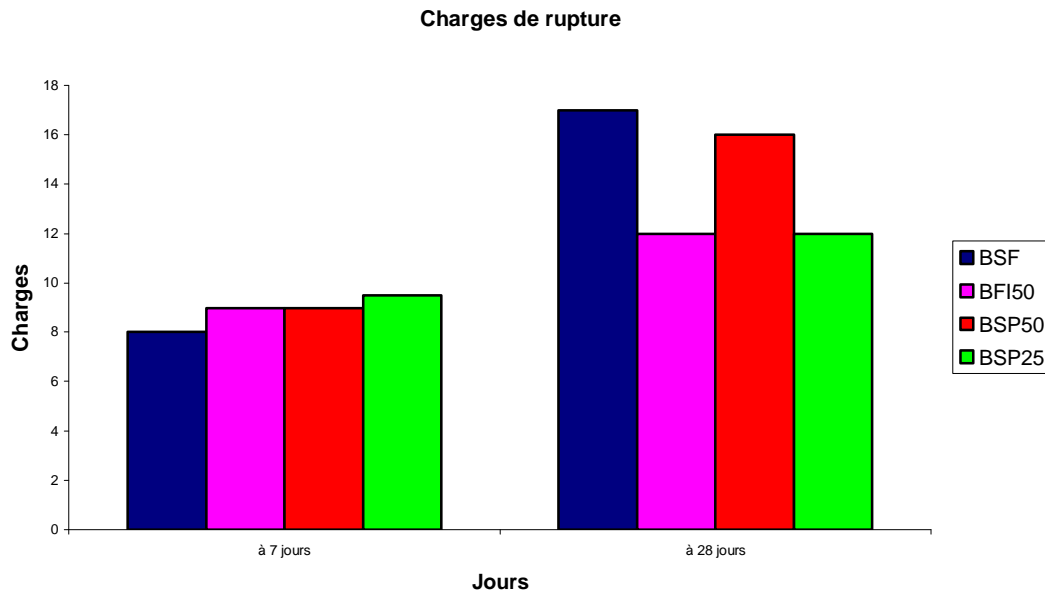
7.2.2 Résistances à la traction

bétons	Résistances à la traction (N/mm ²)		Charges de rupture (KN)	
	A 7 jours	A 28 jours	A 7 jours	A 28 jours
BSF	4.9	8.57	8	14
BFI50	5.5	7.35	9	12
BSP50	5.5	9.8	9	16
BSPP25	5.81	7.35	9.5	12

Tableau 17. Essais à la traction. Eprouvettes 7x7x28 cm



Histogramme 6. Résistances à la traction



Histogramme 7. Charges de rupture à la traction par flexion

Pour tous les bétons nous avons une augmentation de la résistance à la traction, ce qui est conforme à tous les résultats trouvés dans la littérature en ce qui concerne cette particularité. On constate que les BSP25 réagissent comme les bétons témoins, cela peut s'expliquer par la dimension des fibres qui se rapprochent de la dimension d'un gros granulat et fonctionnent ainsi comme un béton sans fibres. Il y a une nette augmentation de la résistance à la traction pour tous les mélanges de 7 à 28 jours. Elles sont de 1.75% pour les BSF, 1.36% pour les BFI50, 1.78% pour les BSP50 et 1.26% pour les BSP25. Il est intéressant de noter que nos sous produits ont un comportement tel que la rupture se fait moins vite pour les BSP50, et que les BSP25 réagissent comme les BFI50. On constate qu'à résistance élevée correspond une rupture plus lente à venir. Les fibres jouent le rôle de frein pour la propagation des fissures et ralentit ainsi le processus de rupture. Dans tous les cas, la conclusion est que la forme et la dimension des renforts interviennent de façon significative sur le comportement des bétons.

8. Conclusion

Aussi bien en termes de volume qu'en termes de finances, les bétons constituent les matériaux les plus utilisés dans le bâtiment. Essentiellement, les bétons sont confectionnés au départ de gravier, de sable, de ciment et d'eau, mais à part ces quatre composants fondamentaux, les bétons actuels contiennent de plus en plus d'additifs et d'adjuvants. Ces derniers permettent de modifier les caractéristiques des bétons de telle manière que ceux-ci, même si la dénomination de "béton" reste d'application, peuvent être considérés comme des matériaux nouveaux.

Les évolutions au niveau du matériau béton ont indiscutablement entraîné de nouvelles applications dont l'impact ne peut être sous-estimé.

Nous avons, dans ce chapitre, traité tous les bétons pour obtenir les différentes valeurs des caractéristiques qui permettront d'optimiser la formulation des bétons que nous allons utiliser pour l'étude des comportements statique et différé. La caractérisation des bétons utilisés pour notre recherche est indispensable pour l'obtention d'un matériau ayant la maniabilité adéquate permettant une bonne mise en œuvre des poutrelles 10x10x120xcm. La détermination des différentes résistances permet de se familiariser avec le comportement à la compression, à la traction des différents bétons en fonction des renforts introduits. L'intérêt de ce chapitre est définir une fiche technique ou « carte d'identification » du matériau. Comme nous travaillons sur un matériau nouveau de part l'introduction de fibres issues du recyclage, la caractérisation mécanique est, nous semble-t-il un passage obligé pour continuer l'étude comparative. La présence des fibres se traduit par une augmentation de la résistance à la traction du béton due à la présence de multi-fissuration dans son comportement. Cela nous amène à poursuivre en nous intéressant au comportement statique des matériaux utilisés.

REFERENCES**[1] NAAMAN A. E.**

« Fiber reinforced concrete: State of progress at the edge of the new millennium. » 9th International Conference on Concrete Engineering and Technology, Concet 2006 (Structural Concrete for the Millennium) Kuala Lumpur, Malaysia, May 2006. 28 pages

[2] BERNIER GERARD

« Caractérisation et contrôle des bétons renforcés de fibres. » Annales de l'ITBTP n° 494, Juin 1991, série : béton 280.

[3] KHEIRBEK A.

« Influence des paramètres de formulation sur les retraits endogènes et de dessiccation de la pâte de ciment. » Thèse soutenue le 25 /10 /1999. Université de Cergy Pontoise .Paris. France.

[4] JOHNSTON C.D, GAMBLE B.R, MALHOTRA V.M.

“Effects of superplasticizers on properties of fresh and hardened concrete.” Washington, D.C. Transportation research board, dec 1979, p.1-7 Transportation research record n°720.

[5] SERNA ROS P.

“Etude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement.”, thèse doct. Ing. ENPC Paris 1984, 77p.

[6] LUB K.B, PADMOES T.

“Mechanical behaviour of steel fiber – cement mortar in tension and flexure, interpreted by means of statistics”. A.C.I Materials journal, 1989, Vol.86, n°1, p.17-28.

[7] NAAMAN A. E.

“Fiber reinforcement for concrete: looking back, looking ahead.” In Proceedings of Fifth RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete (FRC), BEFIB' 2000, Edited by P. Rossi and G. Chanvillard, September 2000, Rilem Publications , SARL, Cachan, France, p. 65 – 86.

[8] CHANVILLARD G.

« Le matériau béton : connaissances générales. » ENTPE ALEAS Editeur. Octobre 1999.

[9] GRANITEX

« Recueil des notices techniques. » Editions 2006

[10] DUPAIN K. LANCHON R. SAINT ARROMAN J. C.

« Granulats, sols, ciments et bétons ». Collection A. CAPLIEZ. Edition CASTEILLA. Janvier 2000.

[11] LESAGE R.

« Etude expérimentale de la mise en place du béton frais. » Rapport de recherche n°37. LCPC. Juin 1974.

[12] ROSSI P., HARROUCHE N., BELLOC A.

« Méthodes de composition des bétons de fibres métalliques » Juillet 1989.

[13] HOUARI H.

« Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenues et cycliques. » Thèse soutenue le 20/10/93. INSA de Lyon. France.

[14] DE LARRARD F.

« Construire en béton ». Collection du LCPC. L'essentiel sur les matériaux. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées. 2002.

[15] ROSSI P.

« Les bétons de fibres métalliques. » Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 1998, 309 pages.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Fibres normalisées
- Tableau 2. Fibres recyclées
- Tableau 3. Composition chimique du clinker
- Tableau 4. Composition minéralogique du clinker (NF EN 196-2)
- Tableau 5. Propriétés physiques du ciment
- Tableau 6. Résistances mécaniques du ciment (MPa)
- Tableau 7. Caractéristiques géométriques du sable
- Tableau 8. Caractéristiques physiques
- Tableau 9. Caractéristiques mécaniques
- Tableau 10. Caractéristiques chimiques
- Tableau 11. Composition chimique de l'eau
- Tableau 12 : Fiche technique du fluidifiant
- Tableau 13 : composition du béton utilisé (pour 1 m³)
- Tableau 14. Essais de caractérisation sur bétons frais.
- Tableau 15. Essais de caractérisation sur bétons durcis
- Tableau 16. Essais à la compression .Eprouvettes 16x32 cm
- Tableau 17. Essais à la traction. Eprouvettes 7x7x28 cm

LISTE DES PHOTOS

- Photo 1 : fibres industrielles FI50 (élanement 83.33)
- Photo 2 : copeau industriel SP50 (élanement 83.33)
- Photo 3: copeau industriel SP25 (élanement 41.66)
- Photo 4. Maniabilimètre
- Photo 5. Eprouvettes 16x32 cm
- Photo 6 : Eprouvettes 7x7x28 cm

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Essai de traction par flexion

LISTE DES HISTOGRAMMES

Histogramme 1. Influence de la nature des fibres sur leur dosage en superplastifiant à maniabilité constante

Histogramme 2. Mesure de l'air occlus des différents mélanges.

Histogramme 3 Mesure de la densité des différents mélanges

Histogramme 4. Résistance à la compression

Histogramme 5. Charges de rupture à la compression.

Histogramme 6. Résistances à la traction

Histogramme 7. Charges de rupture à la traction par flexion

1. Introduction

L'étude de la composition d'un béton de fibres est complexe car il ne s'agit pas d'ajouter des fibres à un béton courant, il ne peut pas être abordé en termes d'équivalence. [1] On veut par notre étude essayer d'analyser le comportement de poutrelles en béton renforcé de fibres métalliques et une étude expérimentale sera conduite sur plusieurs échantillons pour :

- étudier l'effet de l'incorporation des fibres métalliques dans le béton
- étudier la valorisation des sous produits (copeaux d'usinage) en tant que renfort
- déterminer l'accroissement de la résistance à la flexion sous sollicitation monotone croissant
- observer un changement du mode de fissuration
- établir des taux de chargement

Les résultats obtenus peuvent être sensibles à trois éléments :

- la variabilité dans les matériaux : de façon générale, nous avons obtenu une reproductibilité dans les mélanges, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci. Ceci est d'autant plus important que la fabrication des mélanges s'est étalée sur plusieurs mois.
- La variabilité dans la fabrication des éprouvettes : en effet, le mode opératoire au moment de la fabrication peut même avec une procédure adoptée, produire des différences incontrôlées.
- La variabilité dans le dispositif expérimental : la dernière source de variabilité peut provenir du montage expérimental lui-même, car il est impossible de garantir que deux échantillons soient réellement identiques.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale pour quantifier l'apport des fibres métalliques sur les principales caractéristiques mécaniques du composite, de façon à spécifier ses domaines spécifiques d'utilisation. Ainsi sont examinées les lois de comportement (courbes efforts - déformation) en flexion quatre points, en fonction des différentes compositions des bétons et ceci pour deux types très différents de renforts.

2. Rappel des caractéristiques et des mélanges utilisés

Il est nécessaire d'établir ce qu'on peut appeler une fiche technique des différents bétons utilisés. Pour cela, les tableaux suivants réunissent tous les résultats obtenus au préalable et permettant d'aborder l'étude des poutrelles sous sollicitations monotones.

Bétons	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Ciment (kg)	26.48			
Sable (kg)	53.08			
Eau (kg)	11.12			
E/C	0.42			
Fibres (1%)	0.2648			
Fluidifiant (%)	00	0.2	0.05	0.17

Tableau 1. Composition des mélanges pour 40 litres (capacité du malaxeur)

	Maniabilité (s)	Air occlus (%)	Densité
BSF	13	4.4	2.26
BFI50	9	4.2	2.33
BSP50	12	4.2	2.29
BSP25	10	5.1	2.29

Tableau 2. Essais sur bétons à l'état frais

Bétons	Résistances à la compression (N/ mm ²)		Charges de Rupture (KN)		Résistances à la traction (N/mm ²)		Charges de Rupture (KN)	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
BSF	24.43	29	486.5	580	4.9	8.57	8	14
BFI50	27	29	540	580	5.5	7.35	9	12
BSP50	28	35	560	700	5.5	9.8	9	16
BSP25	23	29	460	590	5.81	7.35	9.5	12

Tableau 3. Essais sur bétons à l'état durci. Résistances et charges de rupture

3. Programme expérimental

Nous envisageons dans cette recherche de travailler sur le comportement d'un type de fibres industrialisées et un autre provenant de rebuts métalliques. Nous faisons varier la longueur et la forme des renforts.

Type de bétons	Nombre D'éprouvettes	Corps d'épreuve	Conservation T (C°) HR (%)	Age de chargement	Types d'essais	régulation
BSF	4	10*10*120	20 °C ± 2 55 % ± 5	7 jours	Flexion 4 points	force
BFI50	4					
BSP50	4					
BSP25	4					

Tableau 4. Essais statiques monotones

Le tableau 4 définit le programme et le nombre d'éprouvettes utilisées pour chaque type de béton.

4. Corps d'épreuve et mode opératoire des essais

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur des éprouvettes prismatiques de section 10 x10 et de longueur 120 cm. La distance entre appuis est de 100 cm. Nous avons opté pour un tel essai parce que le mode de chargement permet d'éliminer toute contrainte de cisaillement dans la zone centrale, en y conservant un moment fléchissant constant ; par ailleurs suivant JOHNSTON (1982) [2], la flexion quatre points donne des résultats moins dispersés que la flexion trois points. Le dispositif sera détaillé dans le chapitre 4, puisqu'il est utilisé aussi dans le cadre de l'étude du comportement différé des bétons.

5. Etude statique sous sollicitation monotone de flexion.

Nous avons mené une série d'essais de flexion avec comme objectif l'étude de l'influence de la nature des fibres sur la résistance en flexion. Les poutrelles sont soumises à un chargement statique (monotone croissant), jusqu'à la rupture ; ce qui permettra la détermination de la charge statique de première fissuration, ainsi que la flèche et la charge

ultime pour chaque élément. La première fissuration sur poutrelle est détectée en enduisant la poutrelle d'une couche de plâtre, et en la mouillant quand on réalise l'essai. Cette méthode permet de détecter de visu la fissuration.

La courbe moyenne charge – flèche obtenue par l'essai monotone donne des informations sur l'endommagement du matériau sous sollicitation mécanique

5.1 Courbes charges – flèches

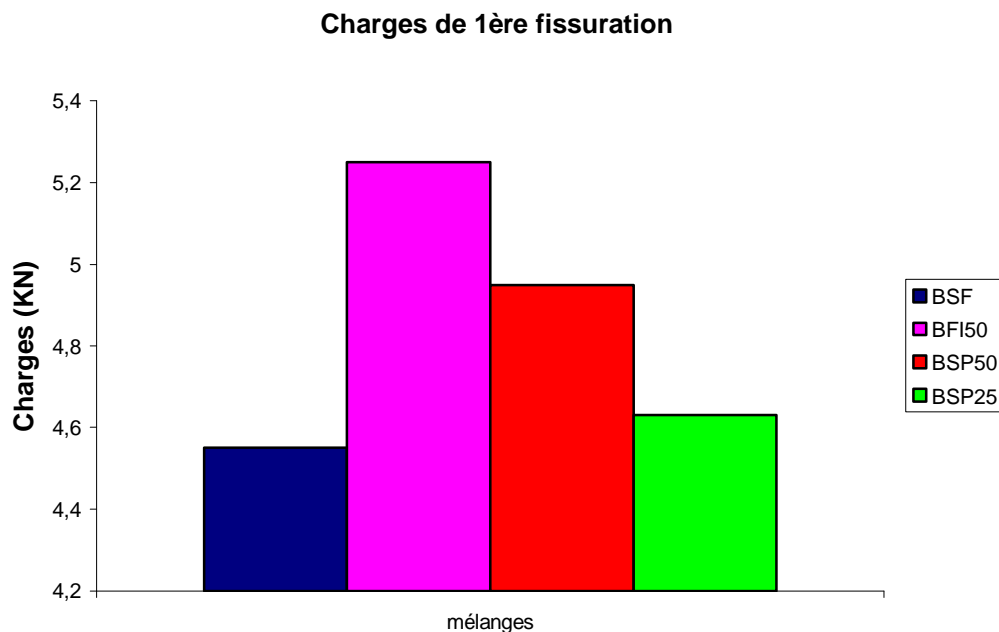
Une série de 16 poutrelles a été soumise à l'essai de flexion quatre points pour :

- § étudier l'effet de l'incorporation des fibres d'acier dans le béton
- § déterminer l'accroissement de la résistance à la flexion
- § observer un changement du mode de rupture

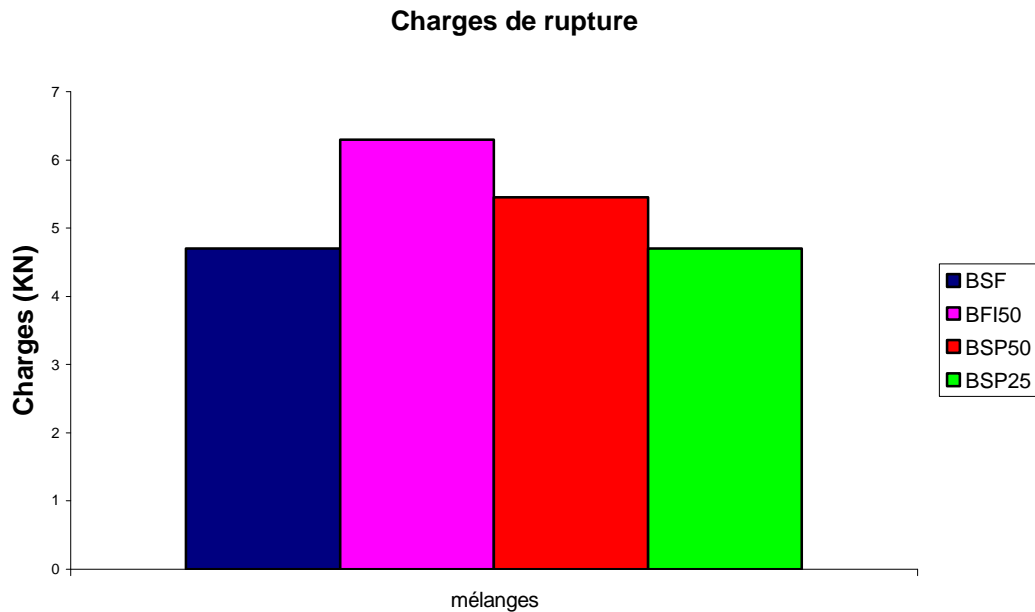
Les essais ont donné les résultats suivants :

Charges	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
De première fissuration	4.55 KN	5.25 KN	4.95 KN	4.63 KN
De rupture	4.70 KN	6.30 KN	5.45 KN	4.70 KN

Tableau 5 : flexion 4 points sur éprouvettes 10x10x120 cm



Histogramme1. Charges de première fissuration. Epreuves 10x10x120 cm



Histogramme 2. Charges de rupture. Eprouvettes 10x10x120 cm.

Les courbes efforts - déformations (flèches) obtenues lors des essais de flexion quatre points sur des corps d'épreuve prismatiques de dimensions 10x10x120 cm font apparaître :

- des résistances à la flexion à 7 jours améliorées pour les BFI50
- une énergie à la rupture supérieure à celle du béton témoin (sans fibres) pour tous les mélanges.
- une réaction identique à la rupture et à la première fissuration pour les BSF et les BSP25
- un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.
- l'augmentation, de la résistance en flexion des mortiers avec fibres est plus importante, elle atteint 1.34% pour FI50, 1.16% pour SP50. Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.
- les résultats varient avec la géométrie de la fibre, son orientation, et son adhérence à la matrice

SWAMY [3] a rassemblé les résultats de diverses expérimentations et propose une formule de régression qui donne la résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du béton sans fibres.

$$\sigma_c = 0.97 \sigma_m (1 - V_f) + 3.41 V_f l/d \quad (\text{Eq.1})$$

V_f = pourcentage en volume des fibres

l/d : élancement des fibres

	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
σ_m (Mpa)	0.45	0.63	0.545	0.47
l/d	00	83.33	83.33	41.66
σ_c	0.455	284.2	284.2	142.06

Tableau 6. Résistance à la flexion d'après SWAMY

L'essai de traction par flexion réalisé sur prismes est certainement le plus significatif du comportement du béton de fibres. Cependant on constate que le résultat de l'essai dépend entre autre de la dimension de l'éprouvette et du mode de chargement.

5.2 Diagrammes charges –flèches

Nous avons mesuré au laboratoire deux paramètres essentiels à la connaissance du comportement statiques des bétons : la charge et la flèche de rupture et de première fissuration.

La détermination de la charge est la mesure de la force appliquée sur l'éprouvette, celle de la flèche est la mesure au milieu de la poutrelle de la déformation. La connaissance du début de fissuration s'impose en construction. Il faut en effet pouvoir évaluer la limite du matériau pour sa mise en œuvre. Sous sollicitations mécaniques, des dégradations observables apparaissent dans le matériau, elles sont responsables de l'évolution des caractéristiques mécaniques de celui-ci. La méthode utilisée est l'observation directe de l'apparition de la première fissure. Une face de la poutrelle analysée est recouverte d'une couche d'enduit de couleur blanche, afin de mieux visualiser la formation et la propagation des fissures. L'évaluation des valeurs de la charge et la flèche de rupture permettra d'estimer les taux de chargement que l'on appliquera aux poutrelles pour calculer la déformation due au fluage.



Photo 1 : Rupture d'une éprouvette renforcée de fibres industrielles



Photo 2 : rupture d'une éprouvette renforcée de copeaux industriels BSP

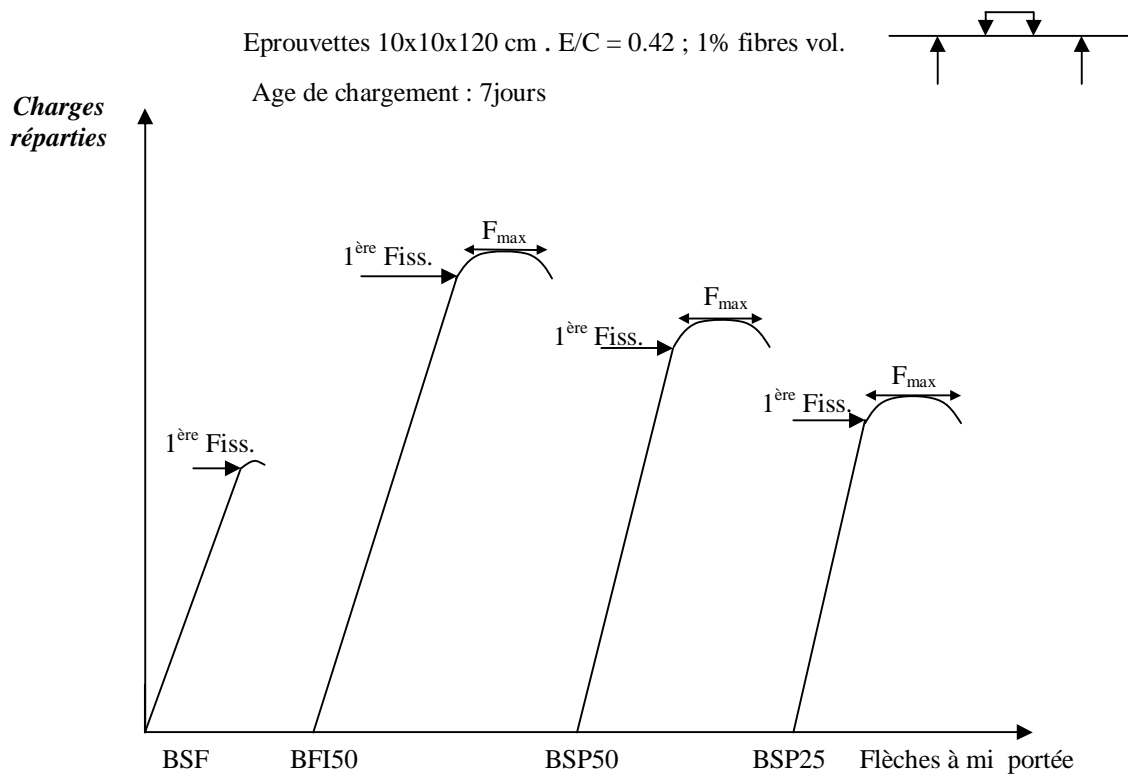


Figure 1. Courbes Charge- Flèche

La première caractéristique des matériaux fragiles renforcés de fibres qui frappe c'est le diagramme charge – flèche en flexion : linéaire C'est un comportement que l'on peut qualifier de quasi – élastique.

La déformation est accompagnée de la fissuration progressive et du glissement des fibres dans leurs gaines. Ce glissement, accompagné de frottement, donne au matériau son caractère amortisseur.

On constate que la déformation des mélanges est peu influencée par les fibres (zone élastique). La présence des fibres n'intervient que progressivement au cours de la déformation. Le point de la naissance de la fissuration et le sommet de la courbe sont influencés davantage par les fibres. Le comportement du composite dépend essentiellement de l'évolution de la microfissure. La matrice ayant atteint sa contrainte de fissuration rompt. Ses bords disjoints sont reliés par les fibres (photo 1). Ces dernières fournissent à la

(pseudo) fissure sa capacité portante résiduelle. C'est le phénomène qui permet d'éviter la rupture brutale (instable) qui se produirait dans une matrice sans renforts. On observe pour les BSP 50 (photo 2) ce type de phénomène. La fissuration qui domine cette partie est fortement influencée par l'énergie élastique et l'hystérésis de l'ensemble machine – poutrelle. Sur les parties descendantes par contre les différences sont nettes : les courbes décroissent plus lentement avec les fibres. Les déformations à la rupture sont augmentées et la fragilité diminuée. Les BFI ont par rapport aux BSF une fissuration plus stable et une capacité d'absorption d'énergie plus élevée. Ces résultats rejoignent ceux de PARANT. [4] Donc on peut introduire la notion de seuil qui représente la première partie linéaire du diagramme charge – flèche qui dépend peu de la teneur en fibres. Cette dernière n'interviendra que progressivement au cours de la déformation. Il faut savoir que cette notion de seuil est surtout spécifique au renforcement en fibres. Le point de début de fissuration est le sommet du diagramme charges – flèches. Le diagramme charges – flèches n'est pas réductible de façon simple au diagramme contrainte – déformation. La contrainte calculée avec une hypothèse de matériau homogène ne correspond pas à une contrainte effective dans le composite. Le tableau suivant donne les résultats des essais mécaniques en flexion.

Bétons	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Ff (N)	4550	5250	4950	4630
δf (mm)	0.40	0.59	0.44	0.42
Fmax (N)	4700	6300	6450	4950
δ_{max} (mm)	0.45	0.76	0.57	0.45
δ_r (mm)	0.45	1.10	0.92	0.52
Fmax / Ff	1.03	1.20	1.10	1.07

Tableau 7. Résultats des essais mécaniques en flexion
(Âge de chargement 7 jours ; poutrelles 10x10x120 cm)
E/C = 0.42 ; 1% de fibres

Avec :

Ff : charge de première fissuration

δ_f : flèche sous charge de première fissuration

Fmax : charge maximale

δ_{max} : flèche sous charge maximale

δ_r : flèche de rupture

On peut dire que :

- la charge de rupture à la flexion des poutrelles en béton renforcé est de 1.16% à 1.34% fois celle des poutrelles en béton sans renforts.
- Cet accroissement est maximal pour les fibres d'acier industrielles ayant un coefficient de forme $l/d = 83.33$.
- Le mode de rupture change : rupture par cisaillement pour les BSF et rupture en flexion – cisaillement pour les BRFM.
- La déformation à la rupture des poutrelles en BRFM est de 2 à 1.26 fois plus grande que celle des poutrelles sans renforts.

Ainsi l'évolution incontrôlée des fissures est empêchée et le béton renforcé présente une certaine ductilité.

La charge après fissuration est supérieure à la charge de fissuration ; elle dépend de multiples paramètres dont ceux liés à la forme et aux dimensions des fibres.

Nous pouvons dire que nos résultats ont montré que l'incorporation des fibres métalliques dans un béton apporte une nette amélioration au comportement en flexion

.Le comportement en flexion peut être résumé de la façon suivante, comme le souligne HANNANT [5], après la première fissure :

- la distribution des contraintes n'est plus linéaire
- les déformations en traction augmentent plus que les déformations en compression
- l'axe neutre est déplacé vers la partie comprimée
- les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations dans la zone de traction.
- le diagramme de traction peut être assimilé à un rectangle tandis que le diagramme de compression reste triangulaire. [6]

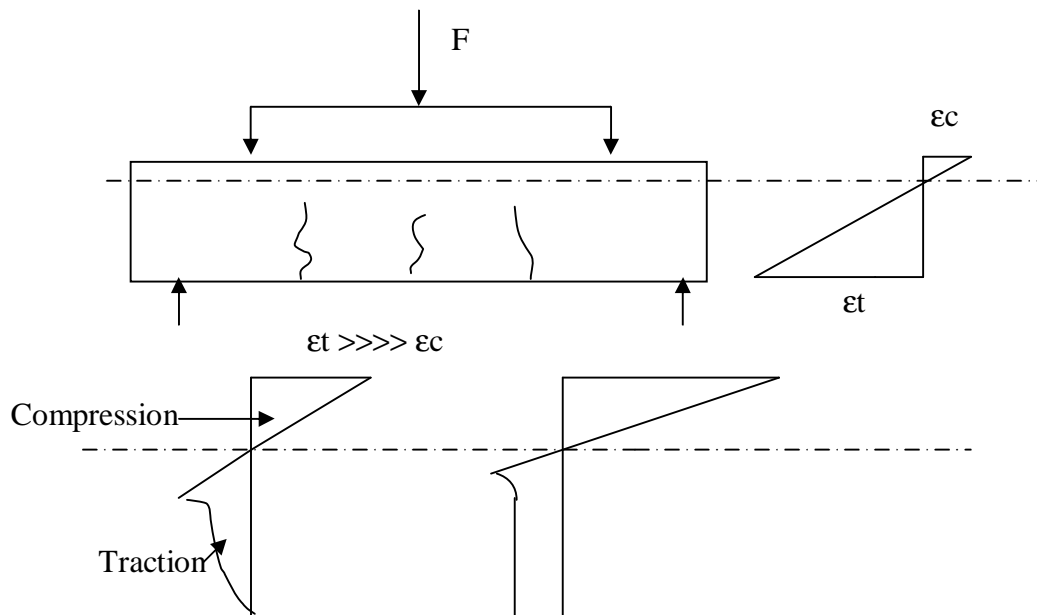


Figure 2. Diagrammes de contrainte et de déformation

Ces remarques sont illustrées par les travaux de JOHNSTON et HOUARI [7]. Il est important de noter que pour les matrices des BSF et des BSP25, les deux seuils repérés (F_f et F_r) sont très proches l'un de l'autre, alors que pour les matrices BFI50 et BSP50, ils sont éloignés. Ceci traduit une différence flagrante de comportement entre les différents renforts retenus.

Ainsi l'évolution incontrôlée des fissures est empêchée et le béton renforcé présente une certaine ductilité.

Ce caractère ductile que possèdent certains bétons renforcés de fibres, résulte d'un processus de plastification successif des différentes fibres dès lors qu'une fissure se développe brutalement après qu'ait été dépassée, dans la dite section, la contrainte de rupture en flexion du béton nu, sans avertissement, car la déformation correspondante est très faible (de l'ordre de 1/1000 de la portée). On peut parler d'une « couture » dans la masse du béton. D'où une certaine ténacité (résistance à la fatigue) et une certaine ductilité (allongement à la rupture important par rapport à l'allongement correspondant à la limite élastique).

L'évolution illimitée des fissures est ainsi freinée voire empêchée, car si les efforts persistent, d'autres fissures vont se former, qui seront à leur tour cousues par d'autres fibres et ainsi de suite. [5]

La charge après fissuration est supérieure à la charge de fissuration ; elle dépend de multiples paramètres dont ceux liés à la forme et aux dimensions des fibres. On peut remarquer qu'une macro fissure se développe progressivement en choisissant le chemin le plus faible (fissure tortueuse) et non selon un plan perpendiculaire à l'axe de la poutre.[8] (photo 3)



Photo 3. Fissuration de la poutre

5.3. Modules d'élasticité

Le module d'élasticité représente une constante mécanique importante des matériaux, il est donné par la pente de la première partie du diagramme (F, δ). C'est un module instantané calculé au premier seuil. On constate que le module expérimental du béton renforcé de fibres métalliques est légèrement supérieur au béton témoin et qu'il croît avec la longueur des fibres.

- fibres industrielles de 50 mm : augmentation de 4.85%
- sous produits de 50 mm : augmentation de 4.35%
- sous produits de 25 mm : augmentation de 2.87%

De nombreuses formules ont été élaborées pour cette constante reliée au paramètre du composite. La manière la plus simple de tenir compte de l'incorporation des fibres est d'utiliser la formule des lois des mélanges :

$$E_c = E_f \delta_f + E_m \delta_m$$

Avec :

E_c : module instantané du composite

$$E_c = 200000 \times 0.01 + 0.99 \times 19050 = 20860 \text{ MPa}$$

On constate une variation de 2.4% entre le module d'élasticité expérimental et celui calculé par la loi des mélanges. En réalité, cette formule n'est valable que si les fibres sont continues. En général, on fait intervenir un coefficient β qui tient compte de la géométrie de la fibre, de l'interface fibre – matrice.

$$E_c = E_f \delta_f \beta + E_m \delta_m$$

Avec β coefficient d'efficacité < 1 .

On peut dire que le pourcentage efficace des fibres de 50 mm est de 94%. On fait cependant remarquer que pour augmenter le module d'élasticité du composite le rapport E_f / E_m doit dépasser 12 pour les matériaux à orientation aléatoire tridimensionnelle des fibres et 3 pour une orientation aléatoire plane.

5.4. Indices de ténacité

L'augmentation de la résistance à la fissuration et celle à la flexion sont les caractéristiques généralement mentionnées, mais la plus importante et la plus typique des BRFM, c'est sa ténacité.

Nature des bétons	Indice
BSF	1
BFI50	1.81
BSP50	2
BSP25	1.50

Tableau 8. Indice de ténacité des mélanges

L'indice de ténacité du BSF est égal à 1, celui des BRFM varie avec le pourcentage de fibres, leur nature mais également avec la vitesse de chargement. Cet indice permet de chiffrer la qualité d'une fibre. Il faut signaler qu'il dépend aussi de l'apparition de la première fissure : si cette dernière se produit rapidement, l'indice sera élevé, si elle se produit tard, l'indice sera faible.

6. Conclusion

Les nombreuses recherches effectuées pour une bonne mise en œuvre et pour l'utilisation des BRFM, font apparaître que cet objectif ne peut être atteint qu'en faisant varier les paramètres qui conditionnent les caractéristiques du béton. L'incorporation dans la composition du béton de fibres métalliques, en forme de spirales, apporte des améliorations notables dans les caractéristiques du béton. Les performances constatées ont été obtenues sans exiger un choix particulier de ciment, ni des granulats naturels issus de concassage. Les résistances relativement élevées des BSP50 à court terme de ce matériau, laissent entrevoir une éventuelle utilisation de ce type de matériau dans la fabrication d'éléments de faible épaisseur, avec une grande durée de service sans entretien ni réparation.

Par ailleurs, les BRFM présentent des améliorations notables de comportement vis-à-vis de la fissuration et que l'ajout de tels renforts a pour conséquence la modification du comportement du béton, alors qu'un béton sans fibres casse de manière fragile. [9]

Les courbes efforts – déformations (flèches) obtenues lors des essais de flexion quatre points sur des corps d'épreuves prismatiques de dimensions 10x10x120 cm font apparaître des résistances à la flexion à 7 jours améliorées, une énergie à la rupture supérieure à celle du béton témoin, un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.

La courbe moyenne charge – flèche obtenue par l'essai monotone donne des informations sur l'endommagement du matériau sous sollicitation mécanique. Cette dernière est utilisée comme référence pour définir des seuils d'endommagement. Une partie linéaire sur la courbe est observée, puis des phénomènes non linéaires apparaissent. Ils correspondent à une localisation de l'endommagement sur une ou plusieurs fissures. Sur les courbes, il est possible de repérer la limite de linéarité qui est supposée correspondre à la première

fissure. Nous allons nous intéresser plus particulièrement au taux de chargement vu le dispositif d'essai en flexion quatre points que nous allons utiliser pour prendre en compte la détermination des déformations.

REFERENCES**[1] BALAGRU P., SHAH S.P.**

“Fiber reinforced cement composites.” Mc GRAW & HILL. New York.1992.

[2] JOHNSTON C.D

« Steel fiber reinforced and plain concrete factors influencing flexural strength measurement.” ACI materials journal.1982. Vol. 79, n°2, 12 p.

[3] SWAMY R.N. , AL NOR. K.

“Flexural properties of steel reinforced concrete”. Concrete, G.B. , June 1975, Vol.9, n°6, pp. 30-31.

[4] EDOUART PARANT

« Mécanismes d’endommagement et comportements mécaniques d’un composite cimentaire fibré multi échelle sous sollicitations sévères : fatigue, chocs, corrosion. » ENPC PARIS. 2003.

[5] HANNANT D.J

« Fibre cements and fibre concretes. » Nex York. J. WILEY & Sons, 1978, 219 p.

[6] JALIL WOLFGANG

« Dallages en béton renforcé de fibres métalliques »

Annales de l’institut technique du bâtiment et des travaux publics. N°522. Mars – Avril 1994.Série : Technique générale de la construction.149

[7] HOUARI H. DEBICKI G. CLASTRES P.

« Behaviour of concrete reinforced with metal fibres under cyclic loading. » Proceedings of the Second International Symposium. Textile composites in building construction. Held in Lyon. France. June 23-25, 1992. Edited by Hamelin P, Verchery G. Paris Edition Pluralis, 1992, Part 1, pp 57 -67.

[8] MAI Y.W.

“Cohesive zone and crack resistance – curve of cementitious materials and their fibre reinforced composites.” Engineering Fracture Mechanics. 2002. p. 219 – 234.

[9] HILLEBORG A., MODEER M., PETERSSON P.E.

“Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements.” Cement and Concrete Research. 1976, Vol.6, n°6, p. 773 – 782.

1. Introduction

Le fonctionnement mécanique d'une structure en béton évolue avec l'initiation des déformations du matériau au cours du temps. Au jeune âge, les déformations proviennent du chargement (déformations instantanées et fluage), mais également du mécanisme de retrait et s'imposent au sein du matériau en phase de mûrissement. [1] A plus long terme, sous charge constante, les déformations de fluage sont prépondérantes avec des valeurs dépendantes des conditions environnementales (hygrométrie, température). Les structures massives (barrages, bâtis de confinement) sont plus particulièrement sensibles à ces déformations qui progressent parallèlement à une micro fissuration croissante. Si le maintien de l'équilibre de la structure est assuré, l'intégrité du matériau peut en revanche être affectée par une augmentation des fissures en son sein par interaction avec l'évolution des déformations de fluage.

Quand il s'agit de modéliser le béton sous chargement de courte durée, il convient de décrire avec précision le comportement élastique fragile du matériau. En revanche, quand il s'agit de chargements appliqués sur une durée plus longue, il faut tenir compte du comportement viscoélastique du béton, du fait de l'importance des déformations différées. Pour comprendre l'influence des déformations de fluage sur la progression de l'endommagement, le comportement différé du béton est étudié sous chargement constant et proche de la résistance.

L'objectif de cette étude est de démontrer que les fibres n'empêchent pas la rupture mais prolongent le temps de déformation et donnent au béton de nouvelles propriétés quand à sa résistance à la flexion. L'intérêt de ce travail est de déterminer le comportement différé de poutrelles sans et avec renforts sous une sollicitation de flexion. Il s'est avéré que c'est la sollicitation la plus fréquente dans les divers ouvrages en béton armé et en béton précontraint.

2. Présentation du dispositif d'essai : bâti de fluage en flexion 4 points

Les études sur le fluage d'une matrice cimentaire portent généralement sur des pièces fléchies et comprimées en béton. On applique la théorie du fluage linéaire. Celle-ci

suppose la proportionnalité des déformations, la planéité des sections déformées, elle donne des relations entre les divers aspects du fluage : déformation sous compression uniforme, déformation d'une fibre dans une pièce fléchie etc. La sollicitation de flexion peut créer en n'importe quel point d'un élément de la structure (sous l'effet d'un moment fléchissant et d'un effort tranchant) des contraintes de cisaillement et des contraintes normales.

Dans le cas des poutres, un système de chargement ponctuel (flexion quatre points) privilégie une section de sollicitations maximales. [2]

La vitesse de chargement influence le comportement du béton. En effet, l'essai de caractérisation mené à vitesse quasi statique permet d'augmenter la durée de l'application des charges et laisse la possibilité de développer des déformations différées. [3]

Pour éviter le problème de gauchissement des sections dues aux contraintes de cisaillement, et pour répondre à l'hypothèse des sections planes, il a été convenu de réaliser un essai de flexion pure. La réalisation de ce type d'essai ne peut se faire que sous sollicitations constantes. Le phénomène de fluage de béton siègeant essentiellement dans la pâte de ciment (celui du granulat est généralement négligé devant celui de la matrice), on a choisi de travailler sur un béton léger. [4]

Le dispositif a été conçu pour pouvoir prendre en compte la variation de paramètres influant sur le fluage tels que le taux de chargement, la vitesse de chargement tout en respectant les caractéristiques géométriques des poutrelles. Pour cela un certain nombre de bâtis ont été montés pour la réalisation des essais de flexion quatre points. [5]

Les essais de fluage en flexion sont effectués sur un système en portique comme le montre la figure suivante :

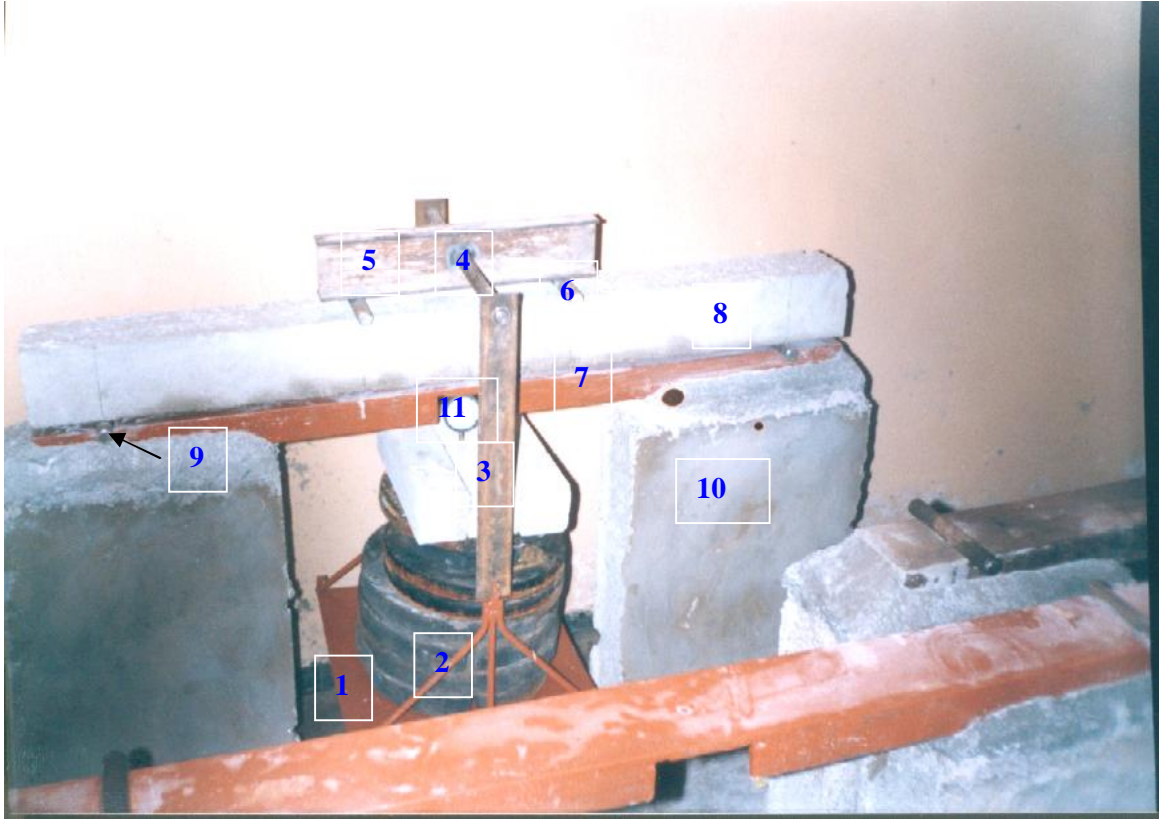
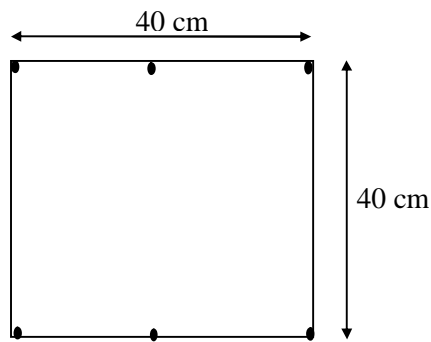
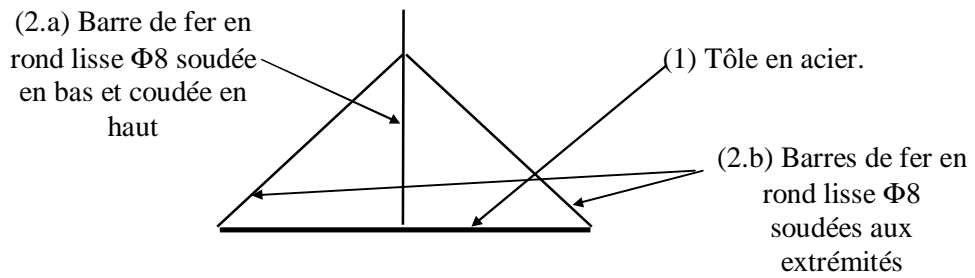


Photo 1. Bâti de fluage

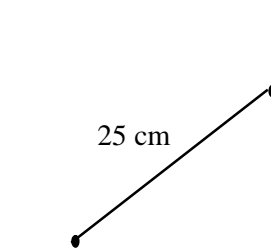
Le bâti comporte un système de chargement manuel. La mise en charge est réalisée à l'aide d'un support qui prend appui sur la partie supérieure du bâti par l'intermédiaire d'une barre rigide de répartition d'efforts. Deux efforts identiques sont transmis par le biais de rouleaux fixés sur la barre. La poutrelle repose sur deux appuis simples constitués de deux rotules (rouleaux en acier). La mesure de la flèche se fait au milieu de la poutrelle.

Les détails du dispositif sont représentés d'une manière détaillée sur les plans I à IV :

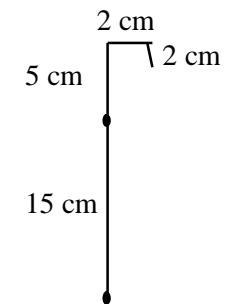
PLAN (I)



Détail de l'élément (1)



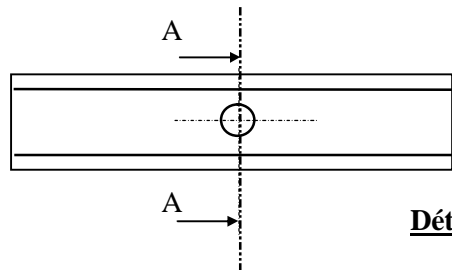
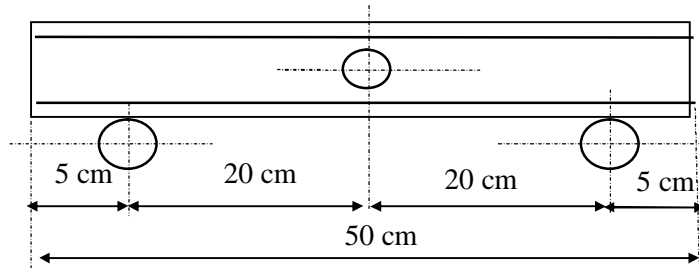
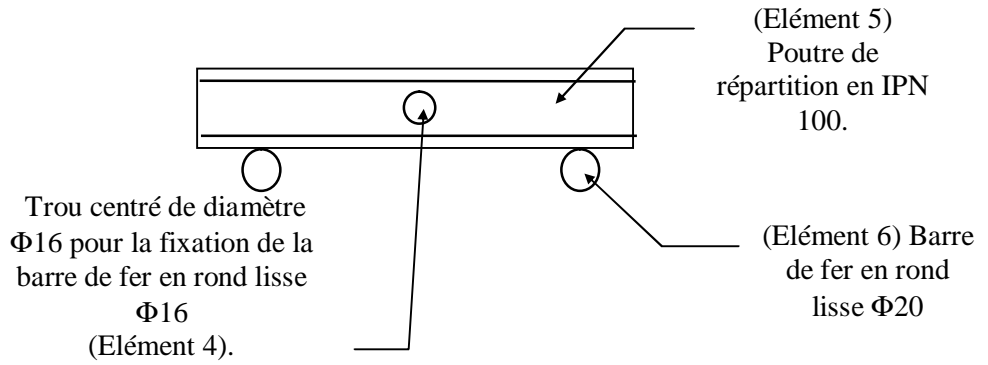
Détail de l'élément (2.b)



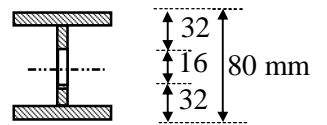
Détail de l'élément (2.a)

DETAIL DU PLAN I

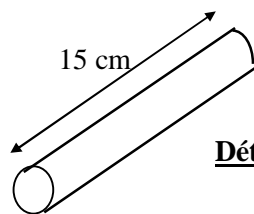
PLAN (II)



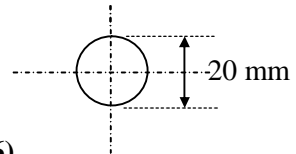
Détail de l'élément (5)



Coupe A-A

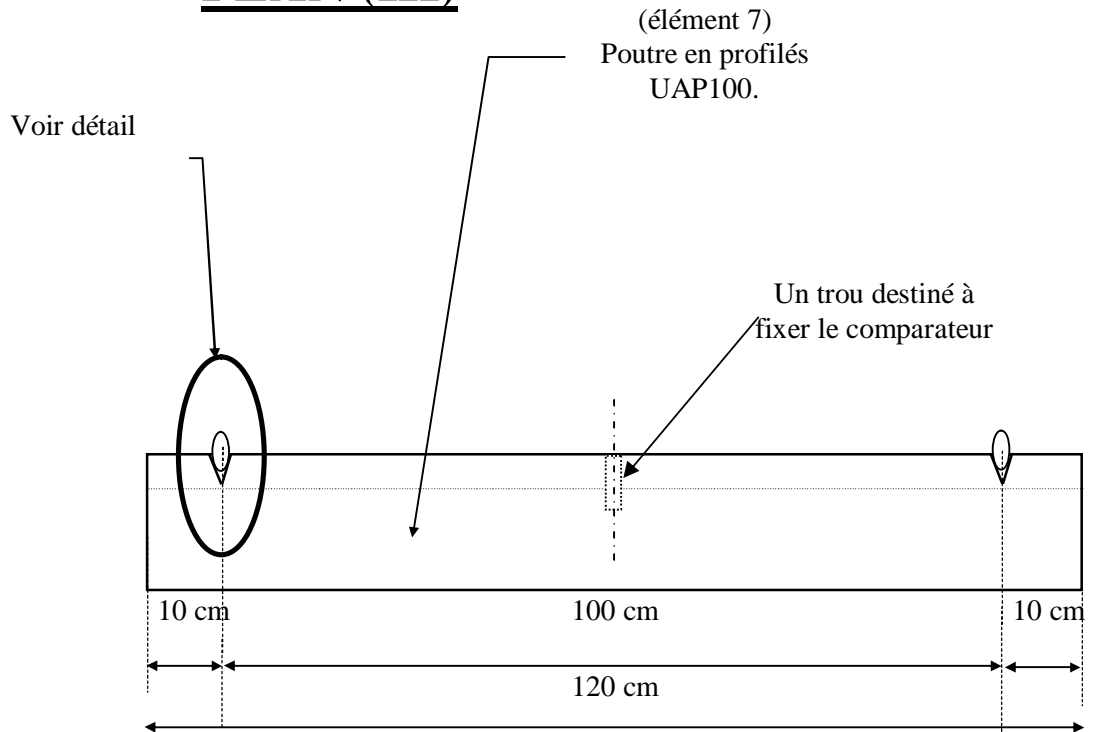


Détail de l'élément (6)

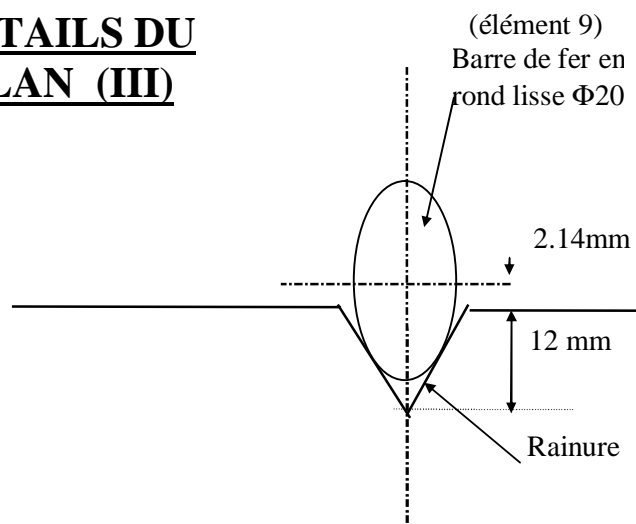


DETAILS DU PLAN II

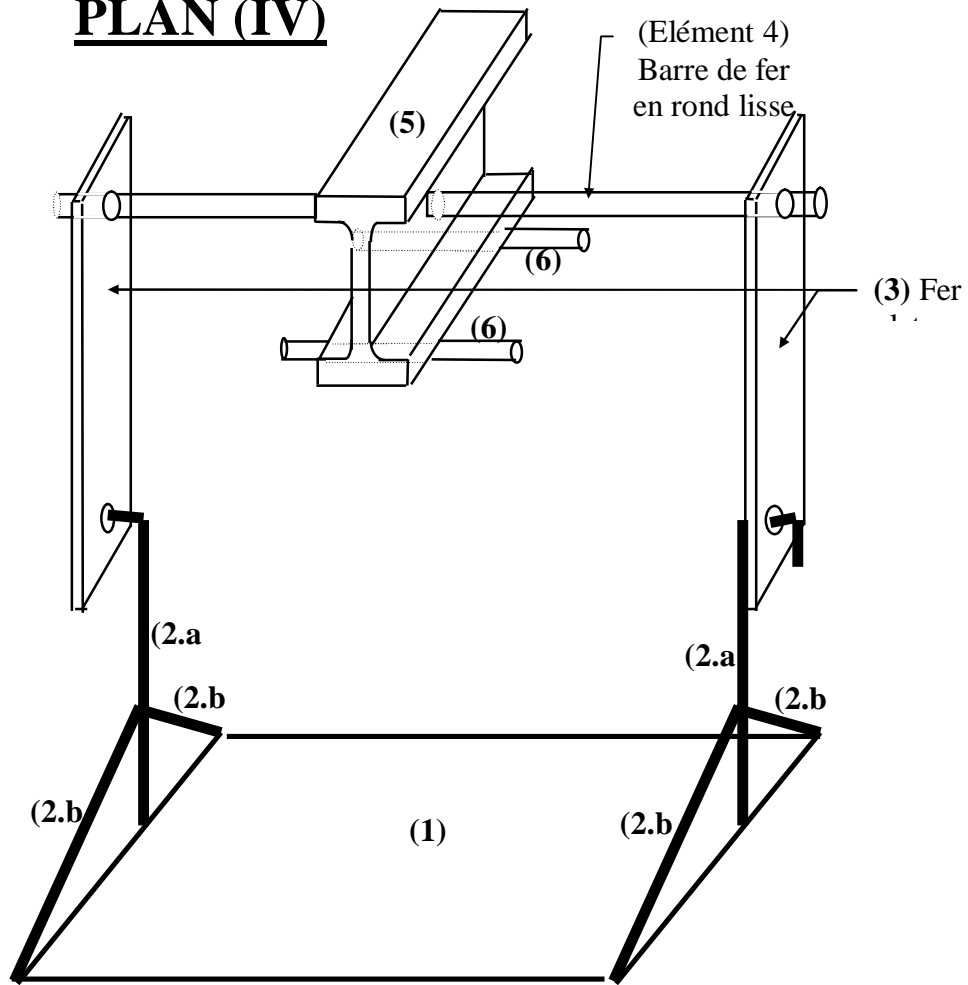
PLAN (III)



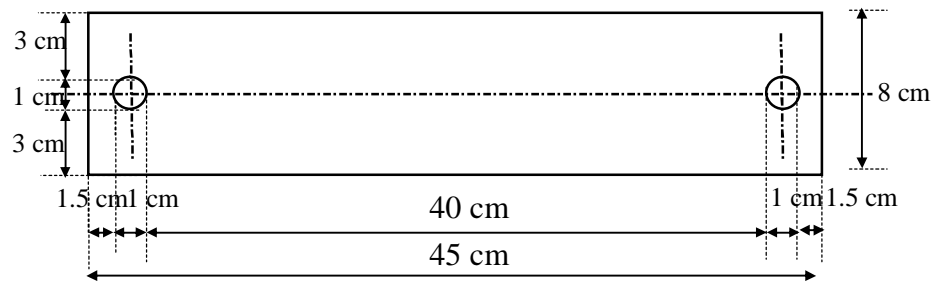
**DETAILS DU
PLAN (III)**



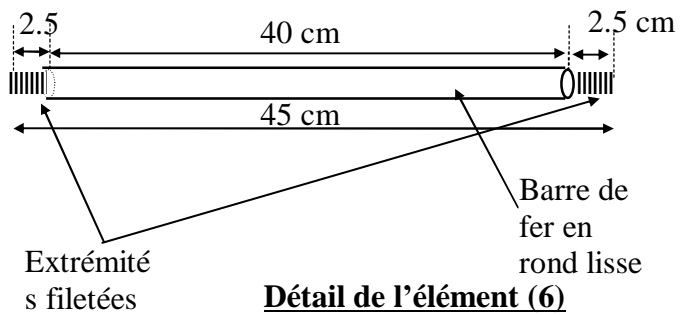
PLAN (IV)



Détail de l'élément



DETAILS DU PLAN (IV)



Détail de l'élément (6)

3. Matériaux.

3.1. Renforts.

Dans notre étude, nous avons opté pour deux types de fibres métalliques. Une fibre normalisée industrielle et un second type composé de deux fibres provenant du complexe de fabrication de moteurs située dans la commune du Khroub. On utilise généralement des fibres métalliques lorsqu'on désire améliorer le comportement d'un béton de structure et si on veut obtenir un matériau plus ductile.

Deux formes ont été étudiées pour avoir aussi des renseignements sur l'ancrage : bâtonnets ondulés et ressorts.

Le choix des renforts s'est fait sur la base de :

- la disponibilité des fibres industrielles sur le marché national
- la disponibilité des fibres comme « déchets industriels » et localisation régionale
- la comparaison entre ces deux types de renforts
- l'inscription dans une démarche de développement durable, d'économie nationale et de recyclage. Cela, s'explique par une volonté d'obtenir une réduction des déchets non biodégradables. Actuellement, dans les pays développés l'avenir des déchets est leur disparition. Pour les pays en voie de développement, comme le nôtre, leur avenir est un recyclage efficace.

3.2 Matrice.

Dans notre approche expérimentale, nous avons effectué nos essais sur des bétons ou sur ce qu'on appelle plus communément des matrices cimentaires. Ces dernières se différencient des bétons classiques par la dimension du diamètre maximal des granulats, qui ne doivent pas dépasser 8 mm, et par une quantité de liant, en général, supérieure à celle d'un béton à maniabilité identique. La composition des mélanges est rappelée dans le tableau suivant :

	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Ciment (kg)	662			
Sable (kg)	1327			
Eau (kg)	278			
E/C	0.42			
Fibres : 1% (kg)	6,62			
Fluidifiant (g)	00	52.96	13.24	45

Tableau 1 : composition du béton pour 1 m³

4. Paramètres d'influence

4.1 Paramètres d'essais

4.1.1 Paramètres importants : éléments représentatifs

Pour réaliser un essai mécanique, un élément « représentatif » du matériau doit être utilisé, afin que les hypothèses des milieux continus soient satisfaites. Le tableau 1 donne en fonction du type du matériau, la taille caractéristique minimale de l'éprouvette qu'il conviendra d'utiliser. [6] [7]

Type de matériau	Type et taille des hétérogénéités	Élément de volume caractéristique
Métaux et alliages	Grain : 0.001 à 1 mm	0.5 x 0.5 x 0.5 mm
Polymères	Molécule : 0.01 à 0.05 mm	1 x 1 x 1 mm
Bois	Fibres : 0.1 à 1 mm	10 x 10 x 10 mm
béton	Granulats ~ 10 mm	100 x 100 x 100 mm

Tableau 2 : éléments de volume macroscopique

4.1.2. Vitesse de déformation et température

La vitesse de déformation peut avoir une influence déterminante sur le comportement des matériaux. Lors de la réalisation d'un essai, on doit utiliser une vitesse aussi proche que possible de celle qui sera utilisée lors de la mise en œuvre. Par exemple, si l'objectif est de valider la tenue au fluage d'une structure sous l'effet de son propre poids, la vitesse à considérer sera très faible. Par contre si l'objectif est de valider la tenue aux séismes de cette structure, alors cette même vitesse de déformation pourra prendre des valeurs plus élevées et la loi de comportement ne sera sans doute pas la même. Ceci conduit à différents types d'essais. Pour notre travail, nous avons réalisé et conservé nos éprouvettes à une température constante (régime isotherme).

Vitesse de déformation (s^{-1})	Régime mécanique	Régime thermique
10^{-6}	fluage	isotherme

Tableau 3. Temps caractéristique et type d'essai

4.1.3. Direction de sollicitation

Lors de la réalisation d'essais mécaniques, le choix de la direction des sollicitations peut s'avérer essentiel. En effet, il conditionne souvent le domaine de validité de la loi de comportement obtenue. On peut classer les directions des sollicitations en deux grandes catégories et on parle d'essais uni et multiaxial :

- les sollicitations uniaxiales
- les sollicitations multiaxiales

Les principaux essais unis axiaux utilisés sont :

- la traction – compression
- la torsion
- la flexion

4.2 Flexion

La flexion (fig.1) est l'essai le plus communément employé sur les poutrelles. La flexion 4 points permet de solliciter le matériau avec un moment constant entre les deux points d'application de la charge. Comme en torsion, la déformation et la contrainte ne sont pas constantes dans l'épaisseur de l'éprouvette. [8]

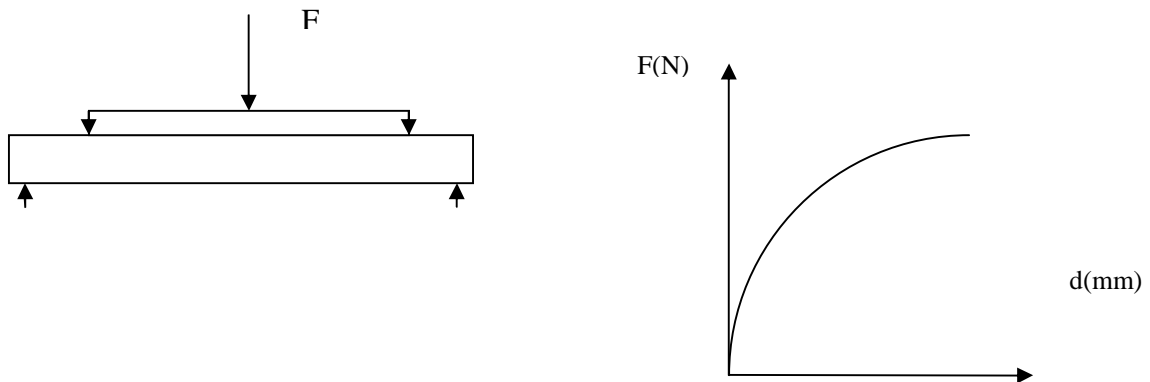


Fig. 1. Schématisation de l'essai de flexion quatre points

L'essai de fluage consiste à soumettre un échantillon à un état de contrainte permanent et constant. Le comportement d'une poutrelle en fonction du temps peut, généralement être étudié expérimentalement sous différentes contraintes de flexion. On calcule la variation de la fonction de fluage dans le temps d'après des mesures :

- mesures de raccourcissement où la détermination du fluage prend en compte des mesures de retrait.
- mesures de déformation d'ensemble, sous l'influence de retrait. [9]

Différents types de fibres dans une même composition de béton sont utilisés. La durée du chargement est supérieure à 30 jours pour tous les essais.

Toutes les poutrelles destinées au fluage ont été disposées dans une chambre de conservation avec une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$, et avec une hygrométrie de $55\% \pm 5$, jusqu'à l'âge de la mise en charge c'est-à-dire 7 jours.

Dès la mise en charge, les corps d'épreuves ont été placés dans une atmosphère définitive :

$T = 20^{\circ}\text{C} \pm 2$, $\text{HR} = 55\% \pm 5$.

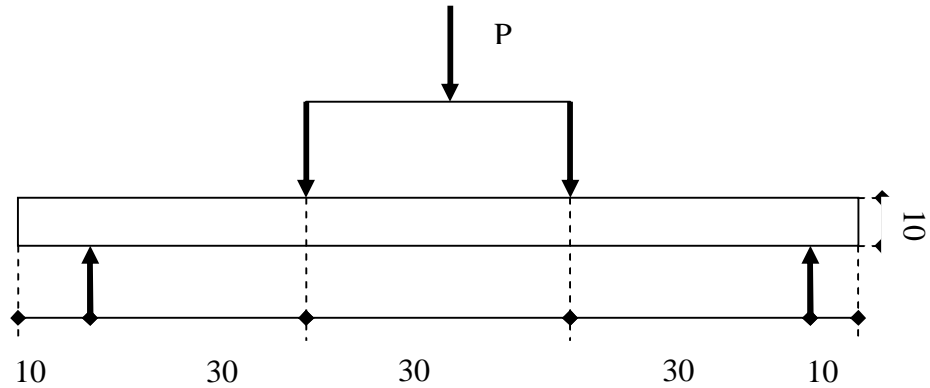


Fig. 2. Eprouvette soumise à la flexion quatre points.

5. Caractéristiques des poutrelles testées

Le tableau suivant donne un rappel des résultats obtenus après les essais de compression (éprouvettes 16 x 32 cm), les essais de traction par flexion (éprouvettes 7x7x28 cm), et les essais de flexion 4 points (éprouvettes 10x10x120 cm).

5.1 Caractérisation et normalisation des mélanges retenus

Bétons	Compression				Traction par flexion				Flexion 4 points	
	Rc (MPa)		Cr (KN)		Rt (MPa)		Cr (KN)		C1ère fiss (KN)	Cr (KN)
BSF	24.43	29	486.5	580	4.9	8.57	8	14	4.55	4.70
BFI50	29	27	580	540	5.5	7.35	9	12	5.25	6.30
BSP50	28	35	560	700	5.5	9.8	9	16	4.95	5.45
BSP25	23	29	460	590	5.81	7.35	9.5	12	4.63	4.70

Tableau 4. Récapitulatif des résultats

5.2 Comportement sous sollicitation de chargement monotone croissant.

Bétons	BSF	BFI50	BSP50	BSP25
Ff (N)	4550	5250	4950	4630
δ_f (mm)	0.40	0.59	0.44	0.42
Fmax (N)	4700	6300	6450	4950
δ_{max} (mm)	0.45	0.76	0.57	0.45
δ_r (mm)	0.45	1.10	0.92	0.52
Fmax / Ff	1.03	1.20	1.10	1.07

Tableau 5. Résultats des essais mécaniques en flexion

5.3. Programme expérimental

Types de béton	Nombre d'éprouvettes	Corps d'épreuve	Conservation T (°C) & HR (%)	Age de chargement	Types D'essais	régulation
BSF	4	10x10x120	20°C ± 2 50 % ± 5	7 jours	retrait	libre
BFI50						
BSP50						
BSP25						
BSF	4	10x10x120	20°C ± 2 50 % ± 5	7 jours	Fluage En flexion	Charge constante
BFI50						Charge par palier
BSP50						
BSP25						

Tableau 6. Programme expérimental : essais sous charges maintenues

6. Résultats des essais de fluage

6.1 Généralités

Le développement au cours des dernières décennies, de nouveaux bétons dont les performances et les caractéristiques diffèrent notablement de celles des bétons courants

utilisés jusqu'alors, leur utilisation de plus en plus fréquente et de plus en plus diversifiée. C'est dans cette logique de progrès qu'a été mise en place une démarche scientifique de manière à apporter les informations pertinentes permettant d'expliquer les modifications sur le comportement différé.

6.2 Paramètres d'influence sur les déformations

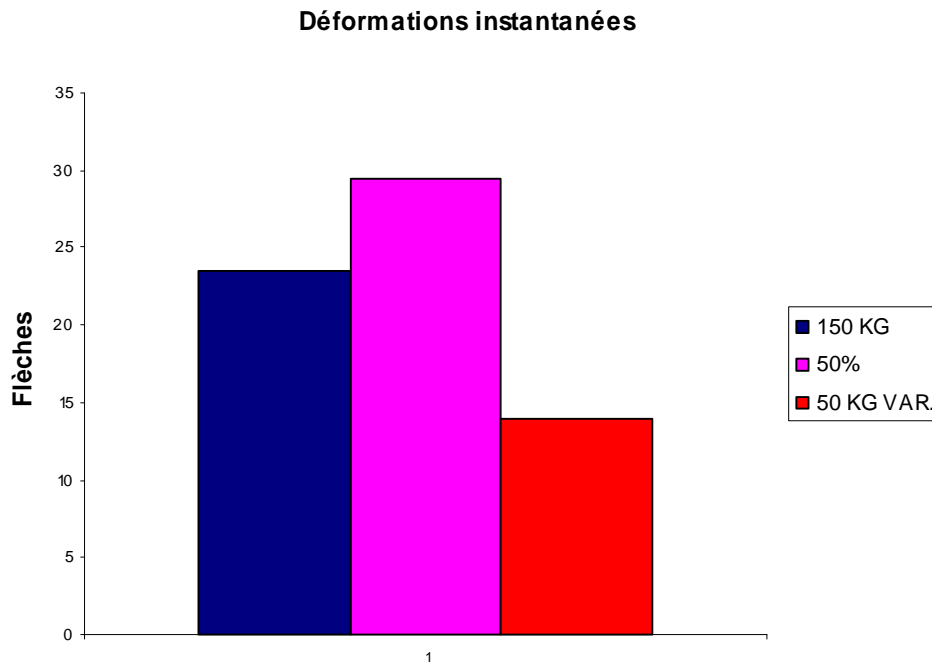
La caractéristique principale de l'association béton – fibres ici en cause est apportée par l'amélioration substantielle des résistances mécaniques des deux constituants. Nous avons donc cherché à quantifier l'influence de la nature et de l'augmentation de l'élanement des renforts, du type et du taux de chargement en positionnant les BRFM par rapport au béton sans fibres.

Nous considérons successivement la réponse globale (évolution de la flèche) en fonction des paramètres d'influence (de composition et de chargement). Les résultats sont présentés et interprétés en cherchant à mettre en évidence l'influence des paramètres constitutifs des corps d'épreuve et d'essais. C'est en effet en procédant de cette manière que l'on sera ultérieurement en mesure de proposer les adaptations les plus appropriées à l'association béton – fibres.

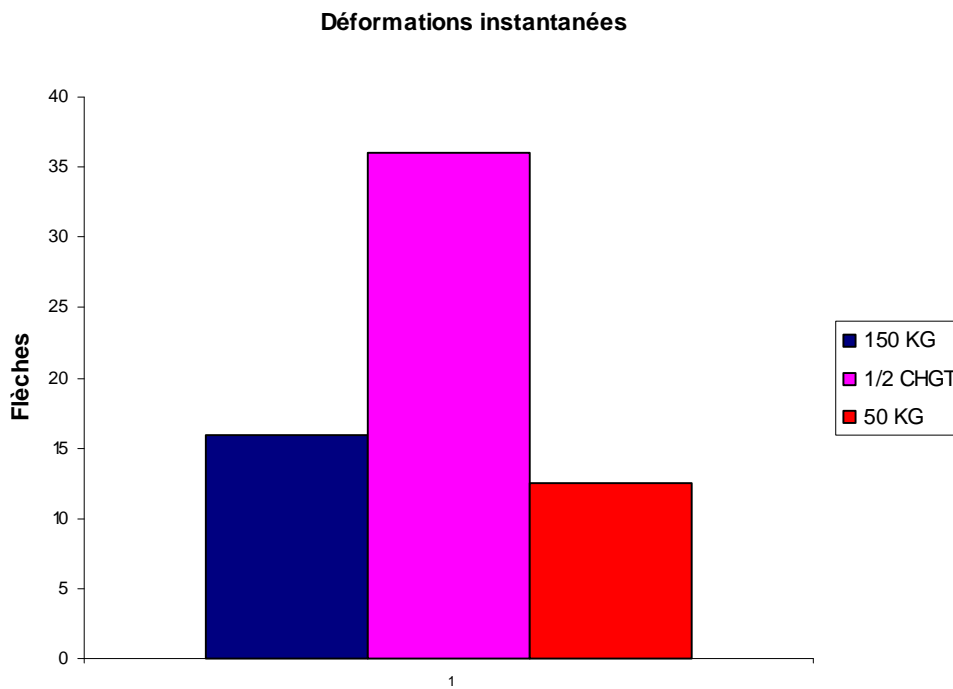
6.3 Influence des différents facteurs sur les réponses du fluage

6.3.1 Influence du taux de chargement

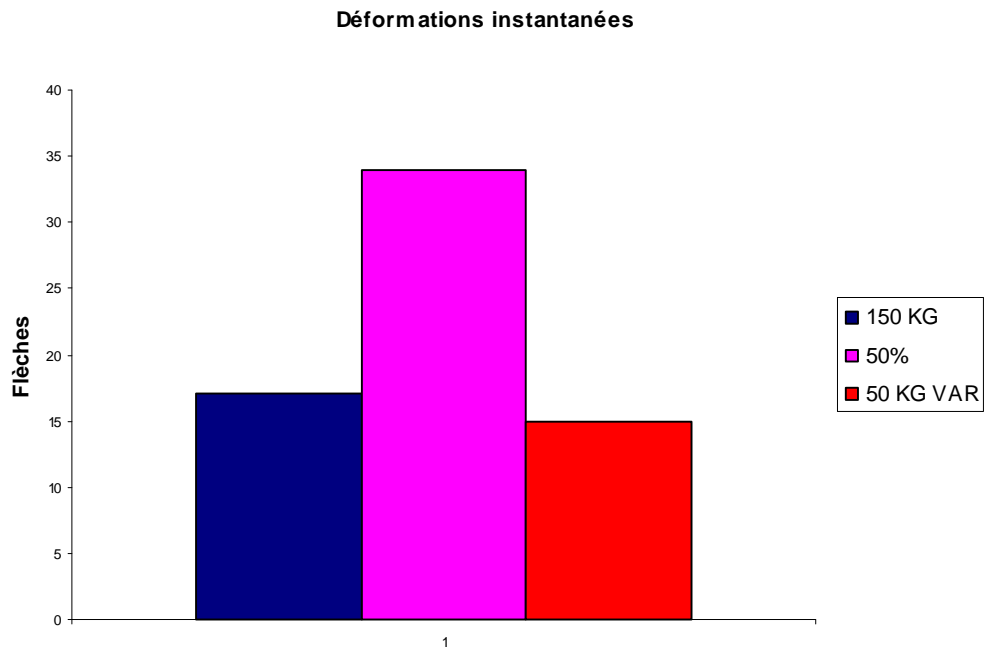
6.3.1.1 Sur la déformation instantanée



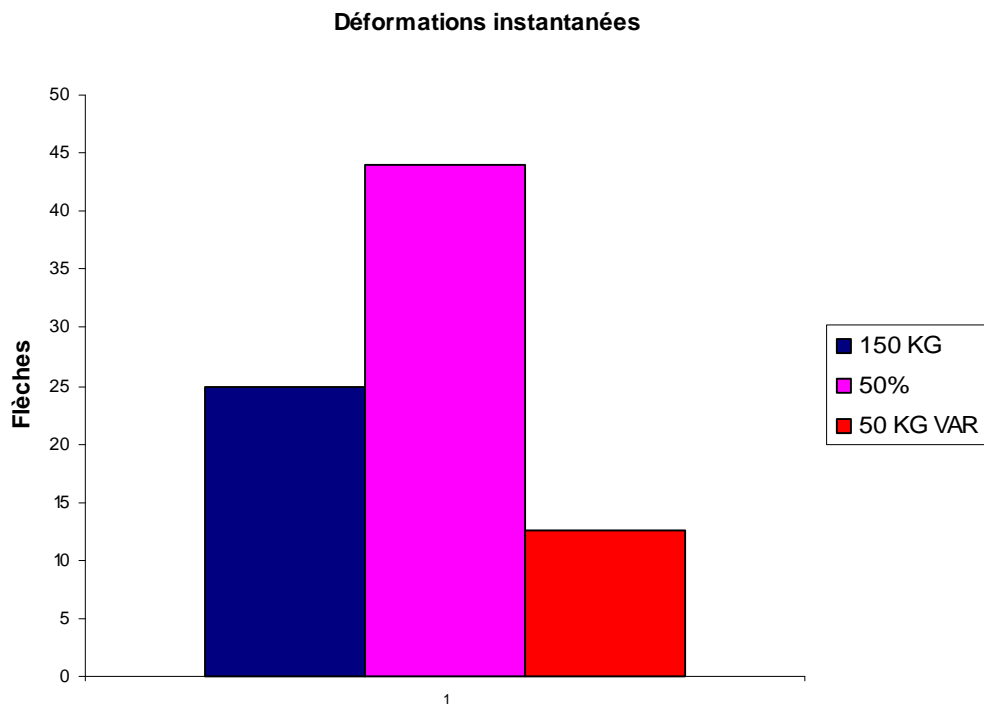
Histogramme 1. Déformations instantanées des BSF



Histogramme 2. Déformations instantanées des BFI50



Histogramme 3. Déformations instantanées des BSP50

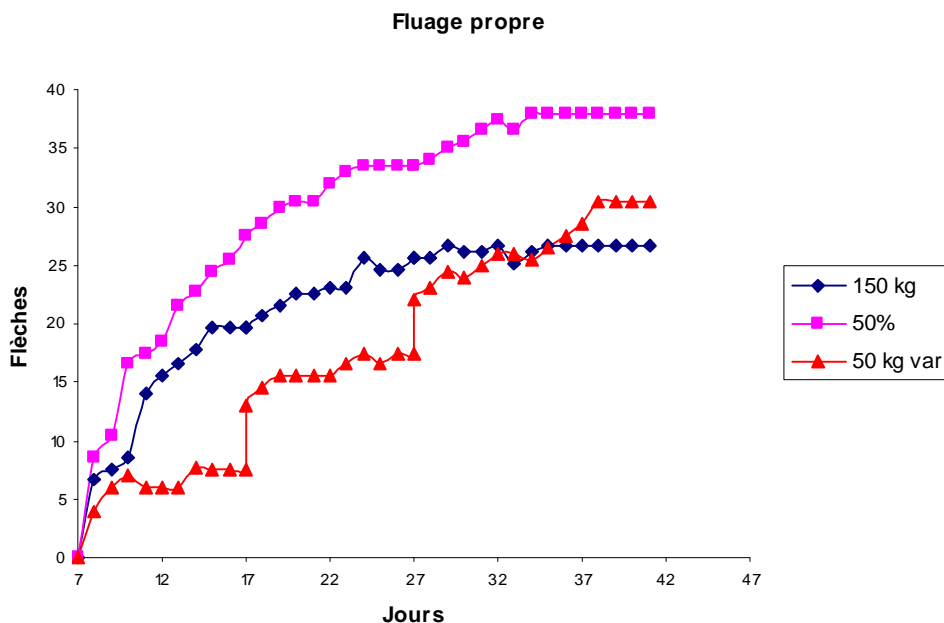


Histogramme 4. Déformations instantanées des BSP25

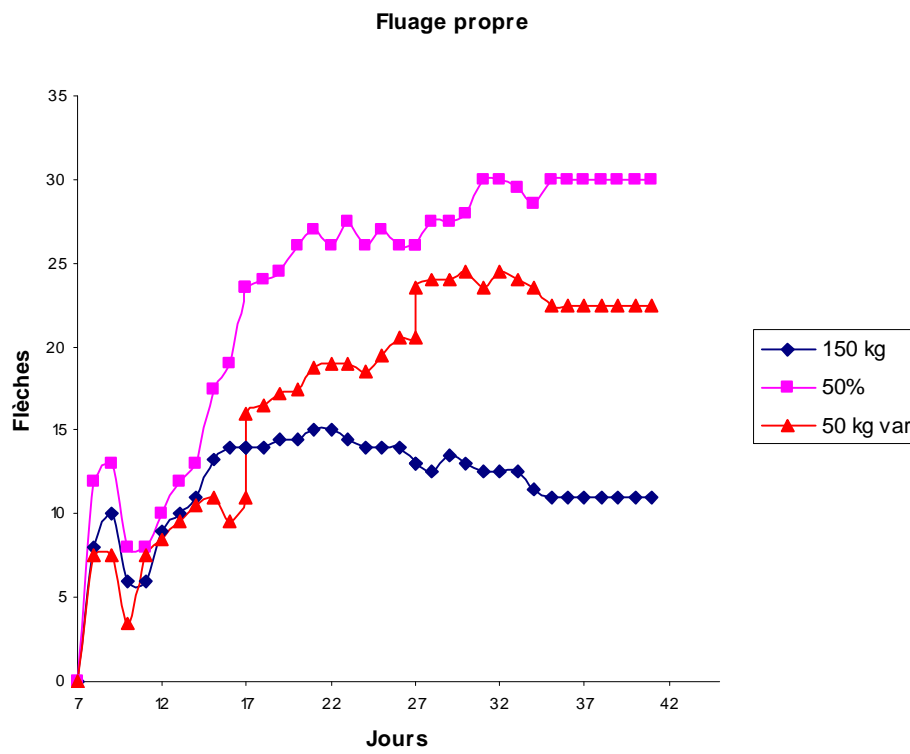
Les histogrammes 1 à 4 permettent la comparaison de comportement des différents mélanges sous différents types de chargement. On observe que quelque soit le taux de chargement appliqué et du type de chargement, les poutrelles présentent un comportement équivalent, c'est-à-dire l'ordre de classement des déformations reste le même. Cela s'explique qu'en chargement instantané, pour des valeurs voisines du module d'élasticité des matériaux élaborés, on constate, qu'à quelques différences près, compte tenu des dispersions importantes et inévitables qui accompagnent ce type de matériau composite, le type et le taux de chargement semblent avoir une influence significative sur l'évolution des déformations instantanées.

En revanche, l'emploi de chargement par palier (3*50 kg) conduit à une flèche plus faible, quelque soit le mélange considéré que pour un chargement maintenu constant de 150 kg. C'est l'effet du vieillissement du béton. A noter, que les flèches obtenues sous différents taux de chargement restent nettement inférieures à celles obtenues lors du chargement monotone croissant de même intensité.

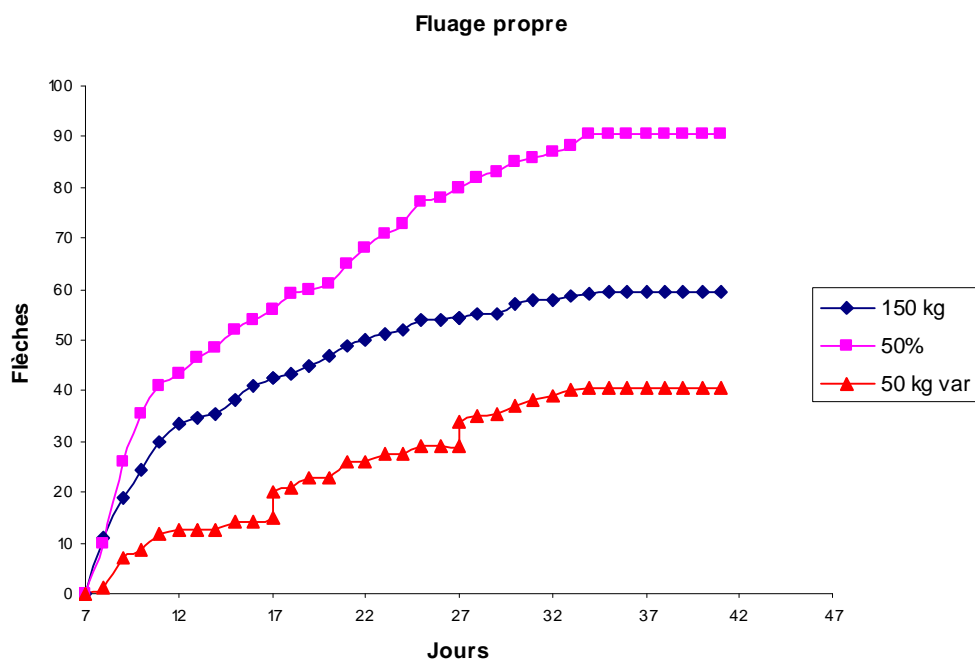
6.3.1.2 Sur le fluage propre



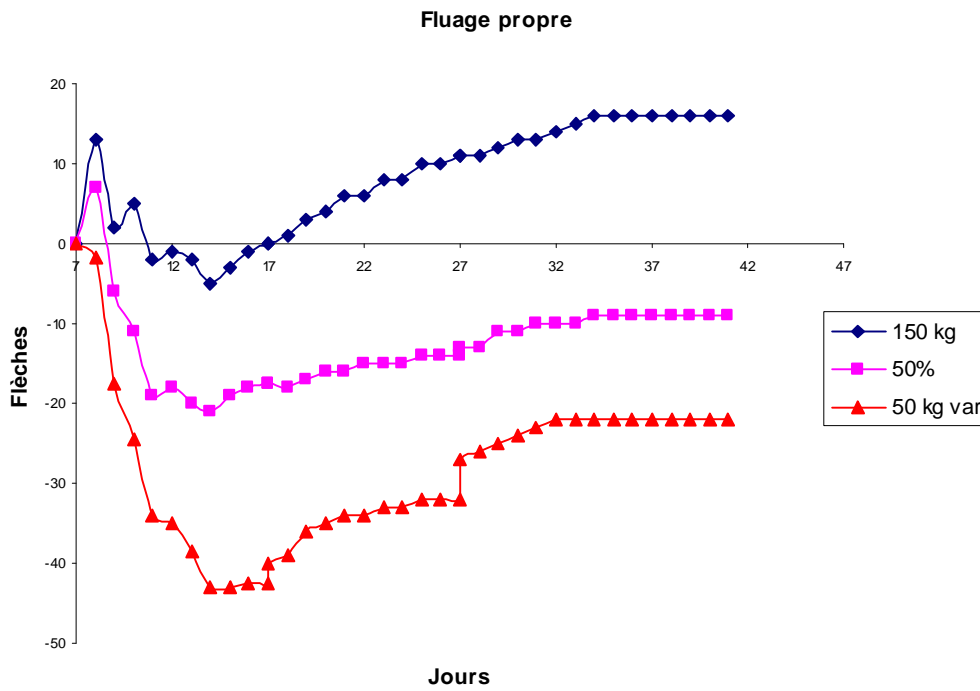
Courbes 1. Fluage propre des BSF



Courbes 2. Fluage propre des BFI50



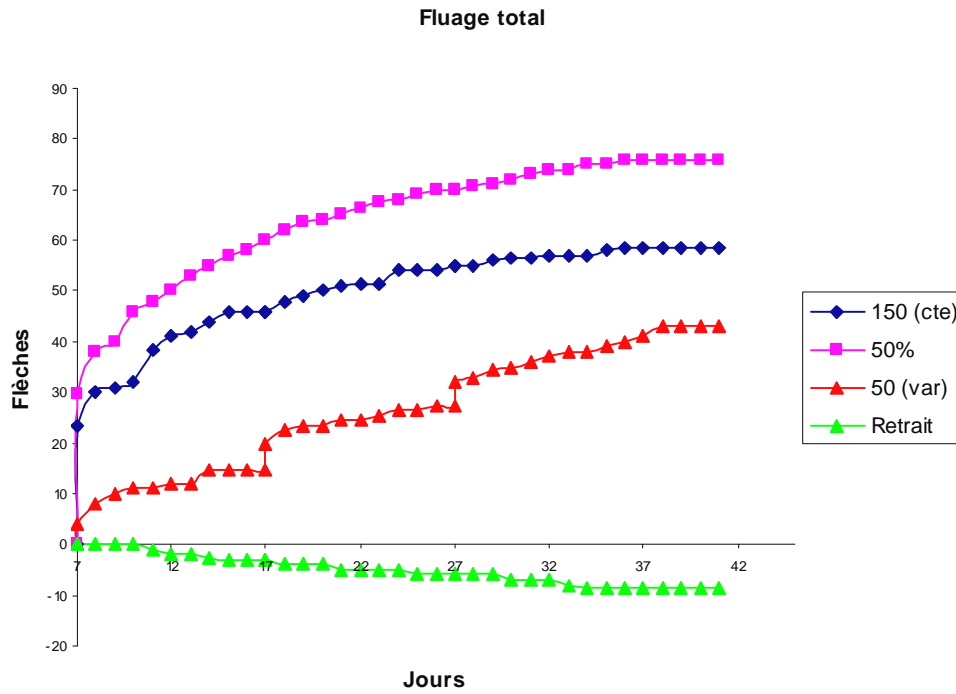
Courbes 3. Fluage propre des BSP50



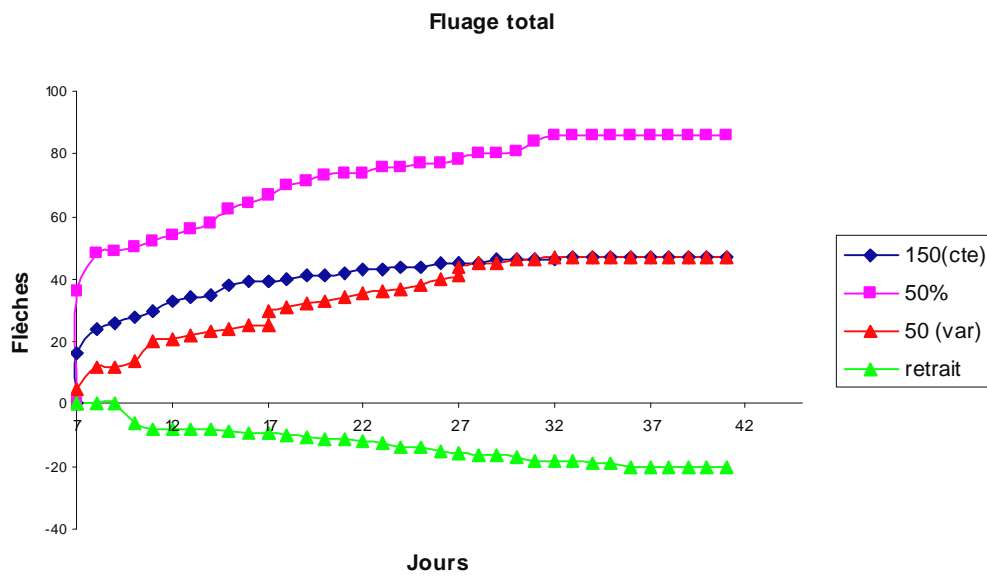
Courbes 4. Fluage propre des BSP25

La réponse au fluage propre des différents bétons est très variable. Cette variation répond à une logique de proportionnalité entre l'importance de la charge et l'importance de la valeur du retrait. La prépondérance de l'influence de ce dernier se traduit par des courbes complètement différentes d'un mélange à l'autre et l'obtention de valeurs négatives pour les BSP25.

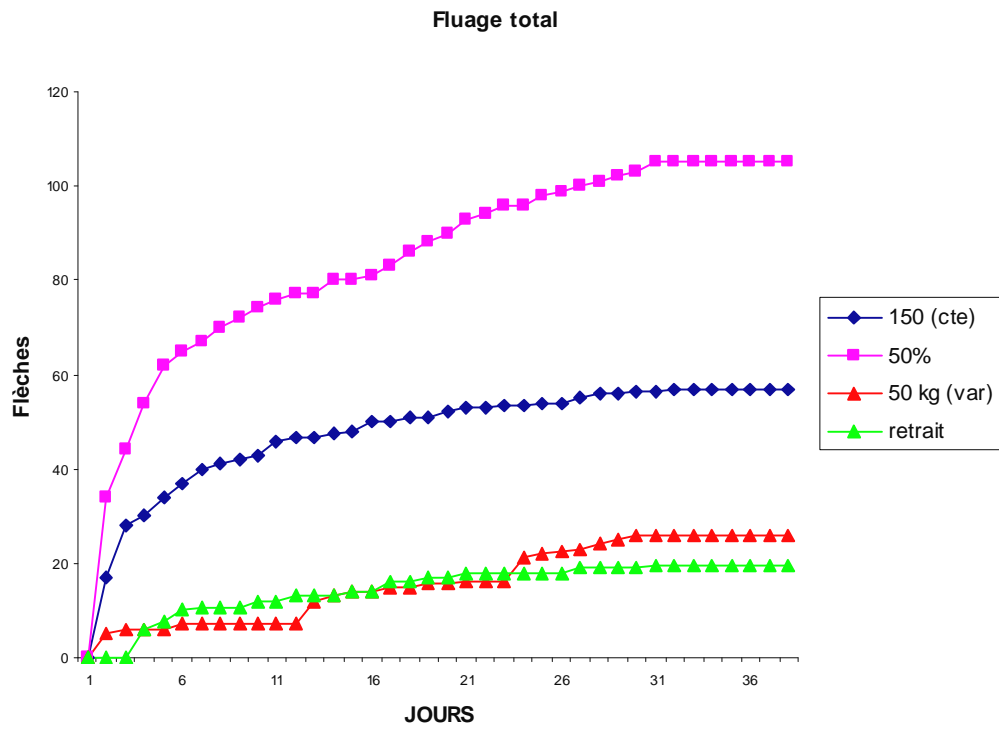
6.3.1.3 Sur le fluage total



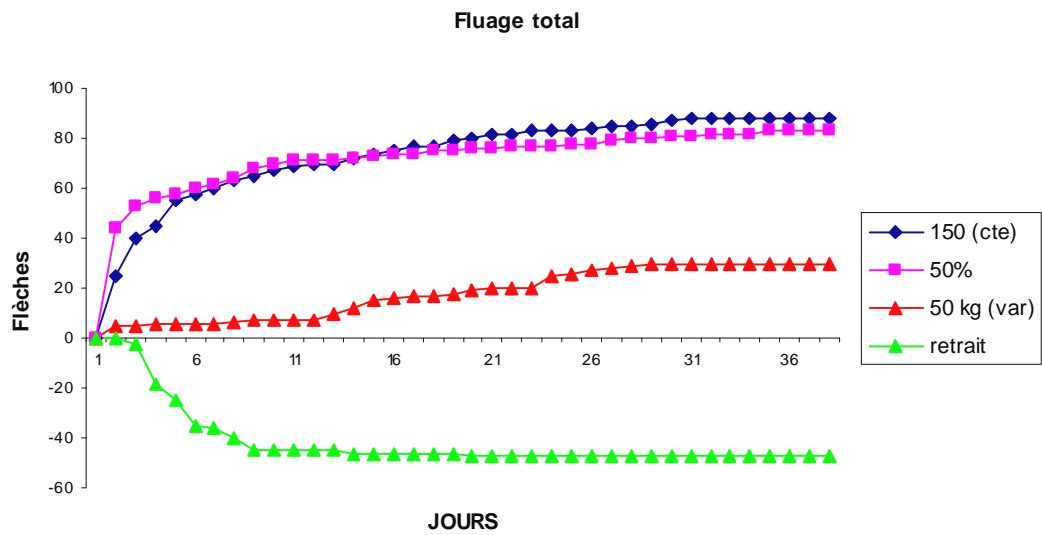
Courbes 5. Fluage total des BSF



Courbes 6. Fluage total des BFI50



Courbes 7. Fluage total des BSP50

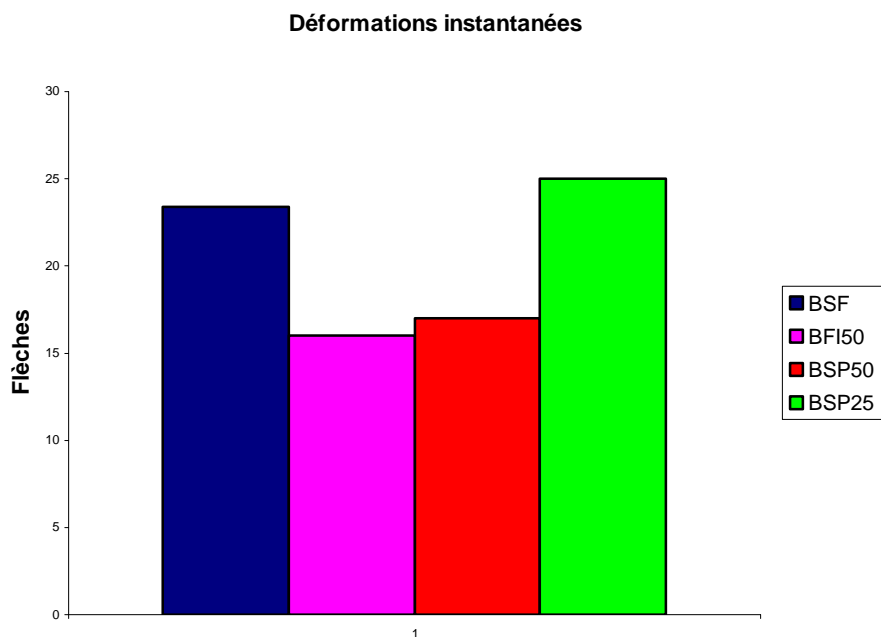


Courbes 8. Fluage total des BSP25

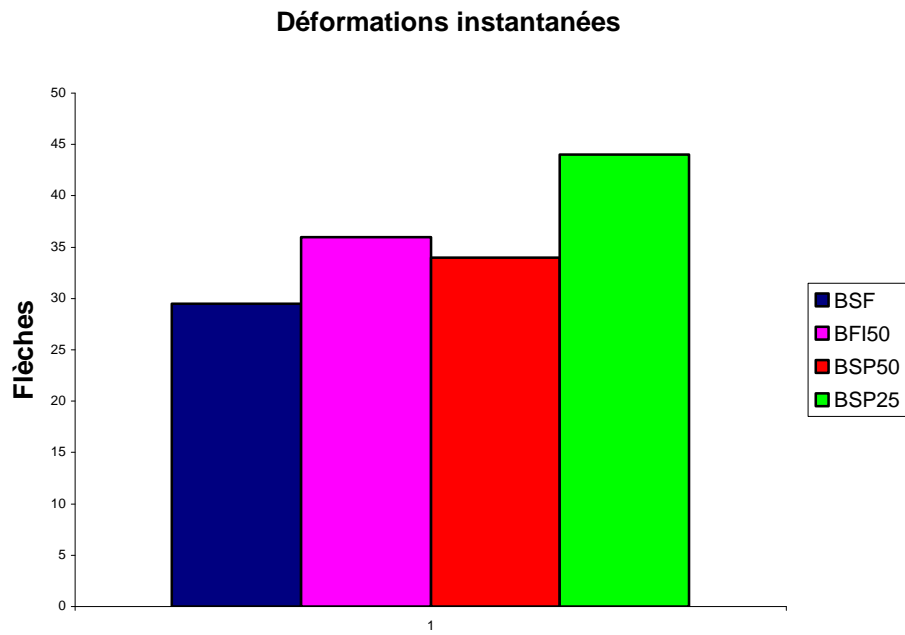
Pour le fluage total ou apparent, nous observons la même variation de la déformation pour tous les bétons. Les écarts entre les valeurs des déformations changent, par exemple, entre les taux de chargement de 150 kg maintenus et de 150 kg par palier, pour les BSF, on a un écart de 10^{-3} mm, alors que pour les BFI50, il est multiplié par 2, pour les BSP50 par 5 et pour les BSP25, il est divisé par 2. Les valeurs des déformations les plus faibles sont celles dues au chargement de 150 kg par palier et cela pour tous les bétons. Cela confirme le fait que le fluage est un phénomène vieillissant, l'âge du chargement influe sur l'intensité de la déformation. [10] Nous avons obtenu des valeurs des retraits compatibles avec ceux obtenus dans la littérature pour les BSF et les BFI50, mais pour les BSP50, un gonflement se produit et les valeurs du retrait des BSP25 est relativement très important. Cela peut s'expliquer par le fait que le degré d'hydratation n'est pas homogène dans le matériau et tend à bouleverser le comportement intrinsèque du matériau. Les différentes poutrelles soumises à leur poids propre sont significatives pour traduire un effet de structure et donc les valeurs du retrait obtenues ne correspondent pas à une uniformisation du retrait induit par la seule perte en eau. La forme et l'élanement des fibres influent sur les déformations des bétons et ceci d'une manière significative.

6.3.2 Influence de la charge maintenue constante

6.3.2.1 Sur la déformation instantanée



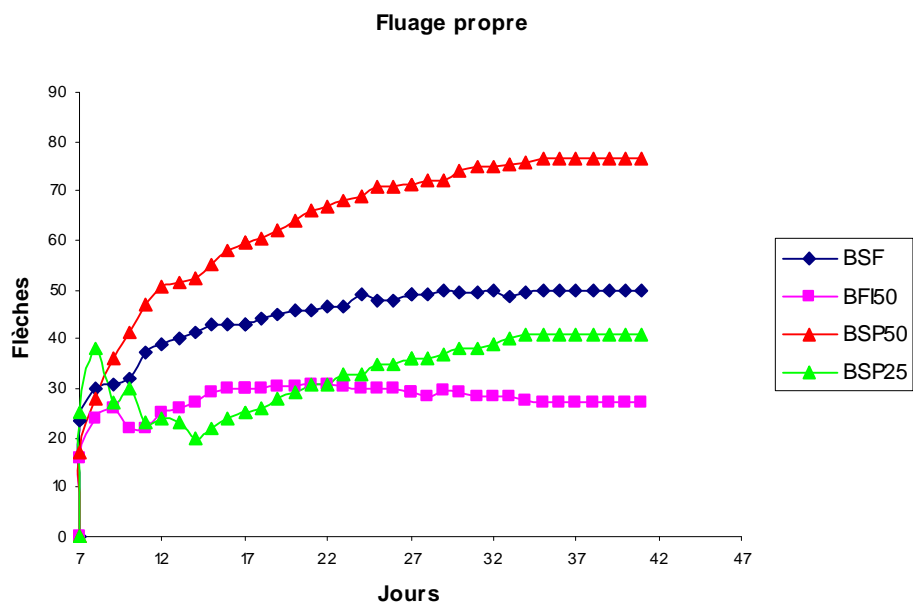
Histogramme 5. Déformations instantanées des bétons sous 150 kg constant.



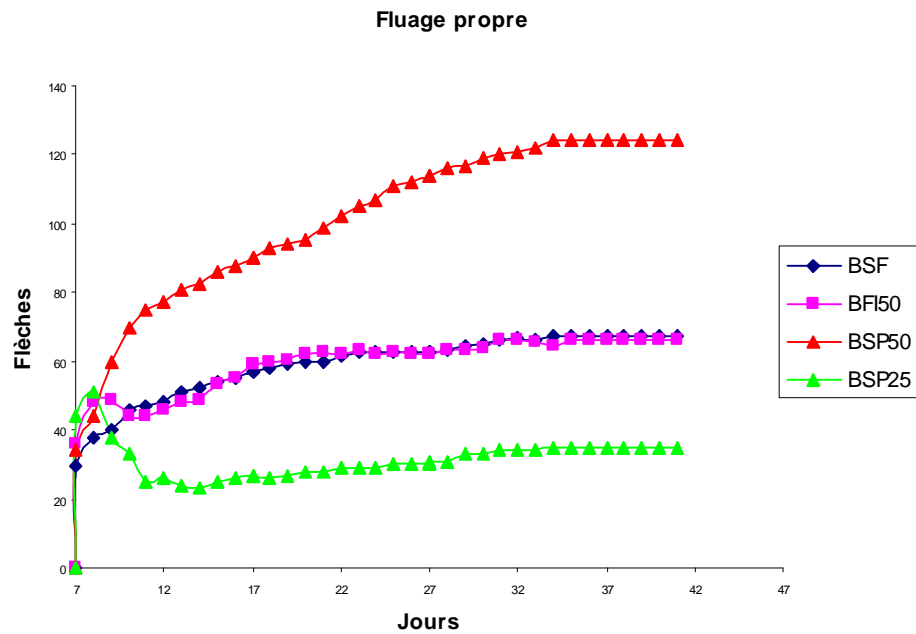
Histogramme 6. Déformations instantanées des bétons sous 50% constant.

Les histogrammes 5 et 6 mettent en évidence l'influence du taux de chargement sur les valeurs des déformations instantanées, il y a une proportionnalité évidente entre les deux.

6.3.2.2 Sur le fluage propre



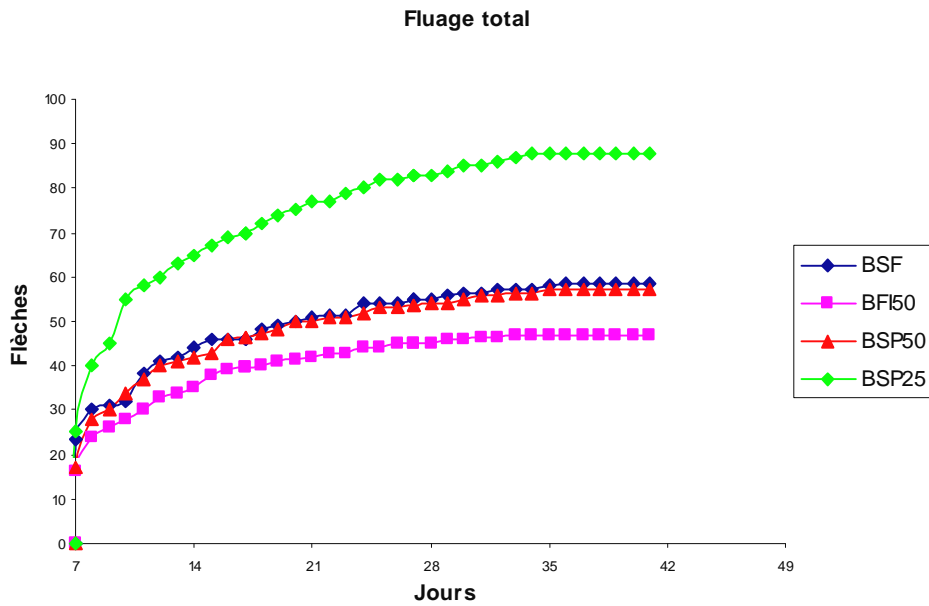
Courbes 9. Fluage propre des mélanges sous charge maintenue (150 kg)



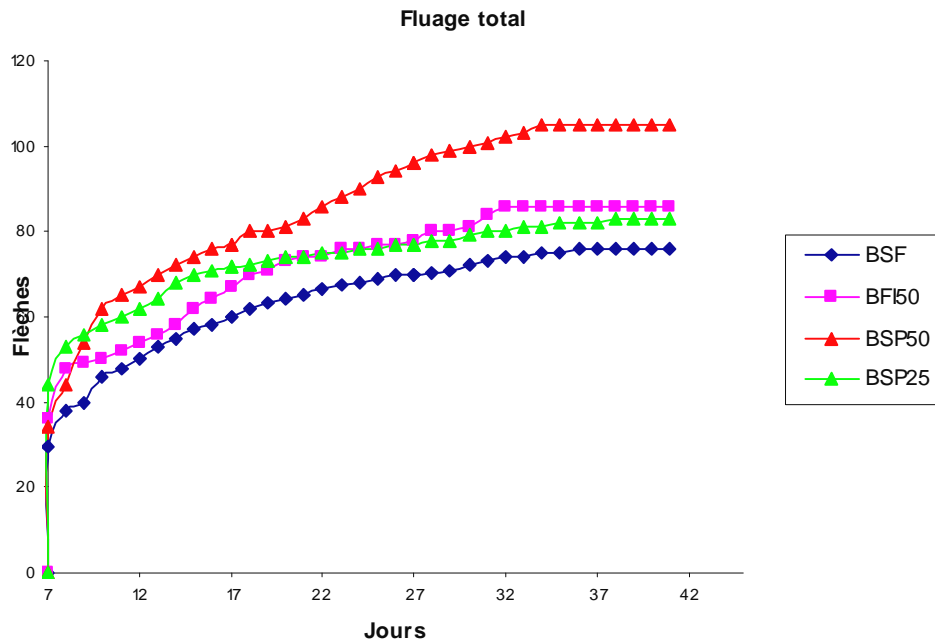
Courbes 10. Fluage propre des mélanges sous charge maintenue (50 % de la charge de rupture)

Les valeurs des déformations des BSP50 sont les plus importantes, elles sont fonction des valeurs du retrait qui dans ce cas particulier, sont positives. Le fluage propre ne donne pas une idée réelle sur l'influence du taux de chargement. Il tient compte des valeurs de la déformation instantanée et du retrait.

6.3.2.3 Sur le fluage total



Courbes 11. Fluage total des mélanges sous charge maintenue (150 kg)

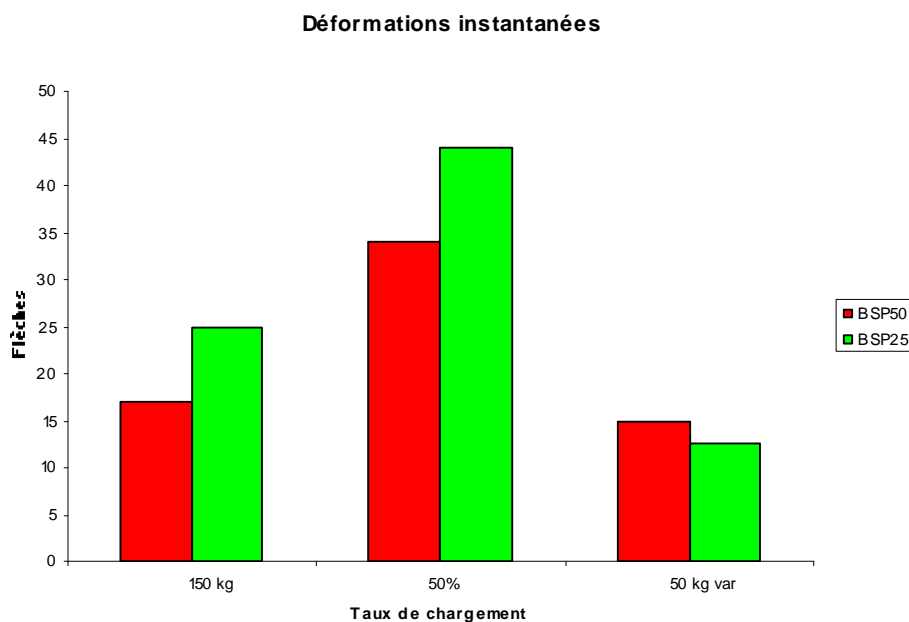


Courbes 12. Fluage total des mélanges sous charge maintenue (50 % de la charge de rupture)

L'analyse des courbes met en évidence que pour des taux de chargement de 40 à 50 % de la charge ultime, le fluage est proportionnel à la charge appliquée. [11] Le béton lorsqu'il est maintenu sous charge constante, continue à se déformer après la réponse élastique à la sollicitation imposée. En règle générale, on distingue deux phases dans l'évolution de la déformation de fluage sous sollicitation constante. Pendant la phase de fluage primaire, la grande vitesse de déformation initiale, décroît jusqu'à devenir constante. A partir de cet état, nous pouvons parler de fluage secondaire. Vu le temps imparti aux essais, il nous est impossible d'atteindre le fluage tertiaire qui se caractérise généralement par une augmentation de la vitesse de déformation conduisant ainsi à la ruine de la structure. [12]

6.3.3 Influence de l'élanement de la fibre

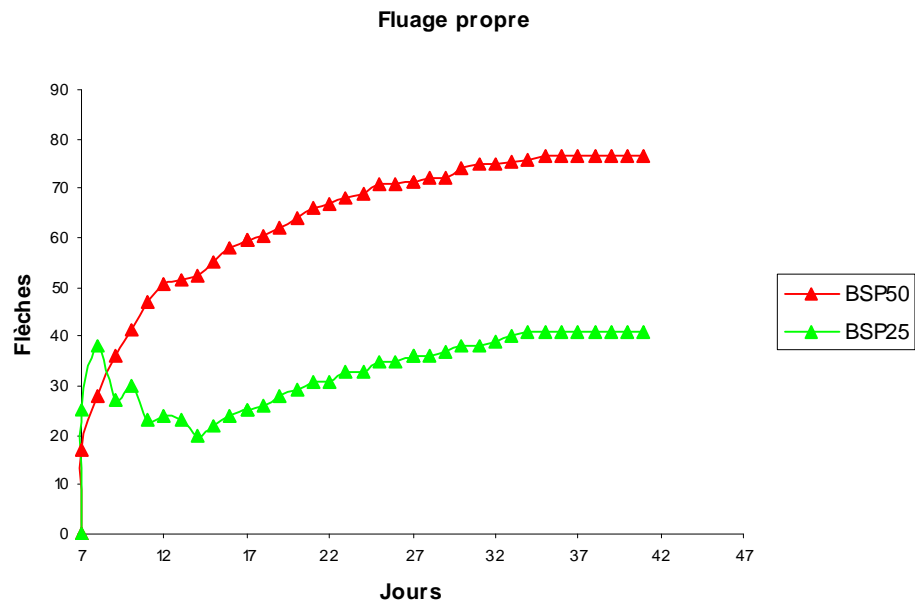
6.3.3.1 Sur la déformation instantanée



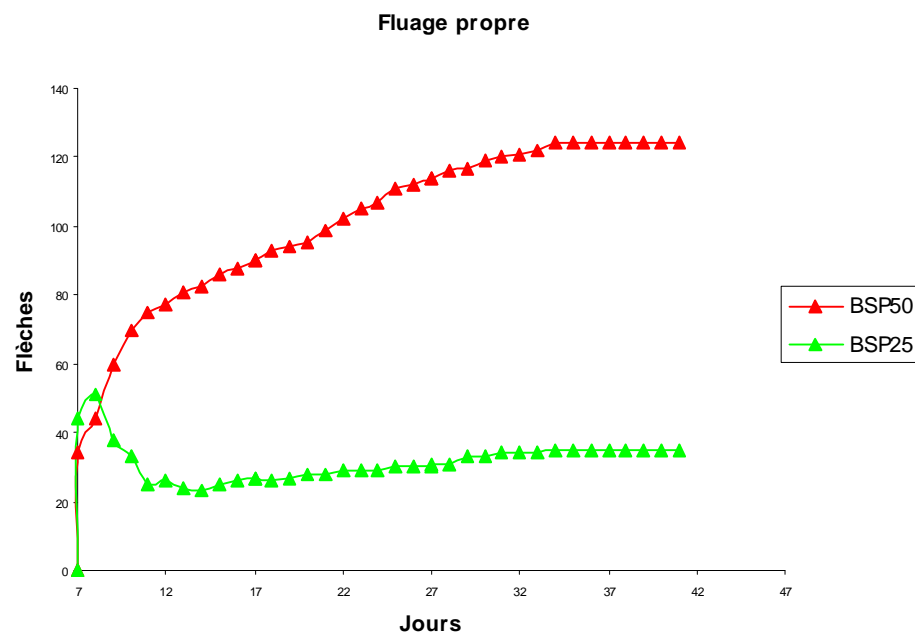
Histogramme 7. Déformations instantanées des bétons de fibre

On constate que les valeurs des déformations instantanées les plus importantes sont celles des BSP25 sauf pour le chargement par palier. Les BSP50 ont un comportement intéressant dès l'application d'un chargement, la déformation est la plus faible. Donc dans ce cas précis, on obtient de meilleurs résultats avec des fibres longues.

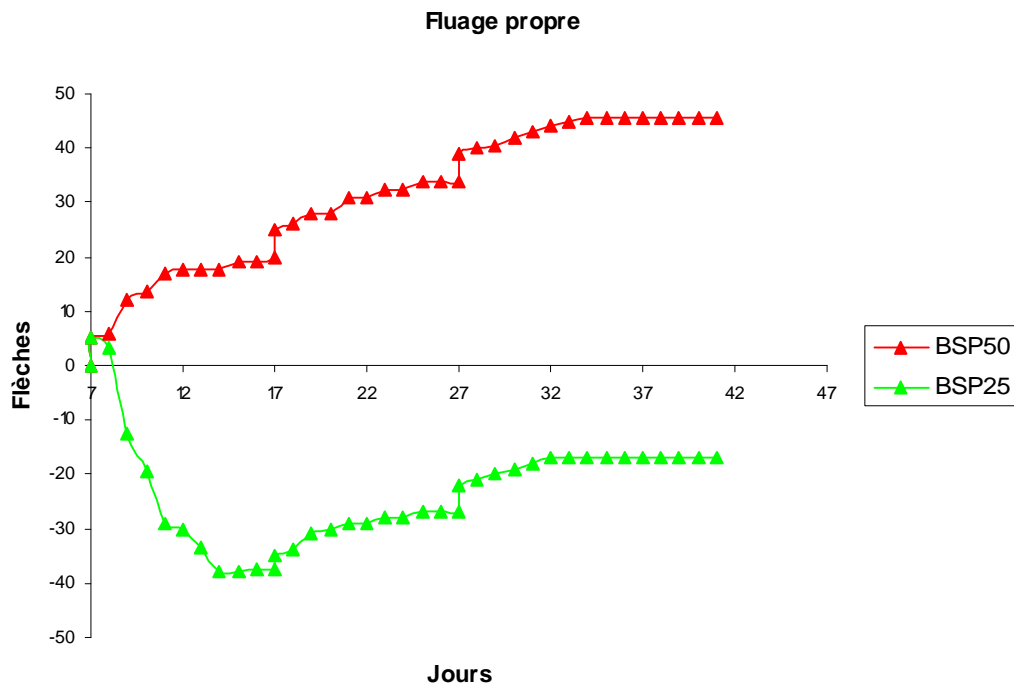
6.3.3.2 Sur le fluage propre



Courbes 13. Fluage propre des bétons de fibres (150 kg)

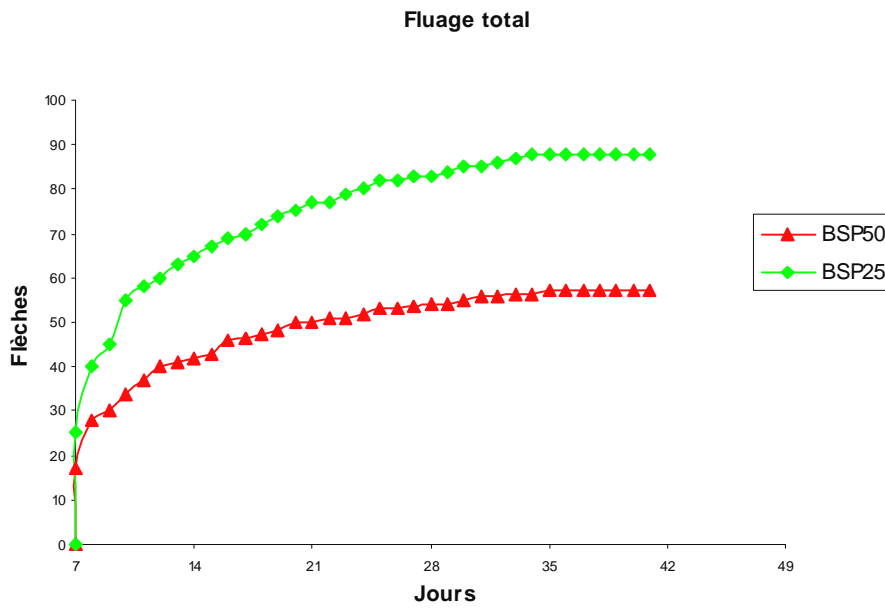


Courbes 14. Fluage propre des bétons de fibres (50 % de la charge de rupture)

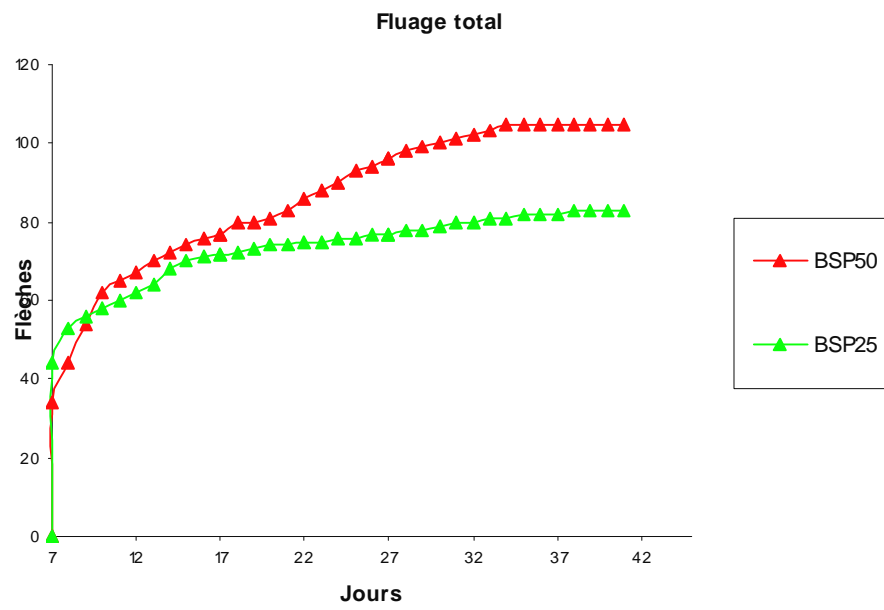


Courbes 15. Fluage propre des bétons de fibres (150 kg par palier de 50 kg)

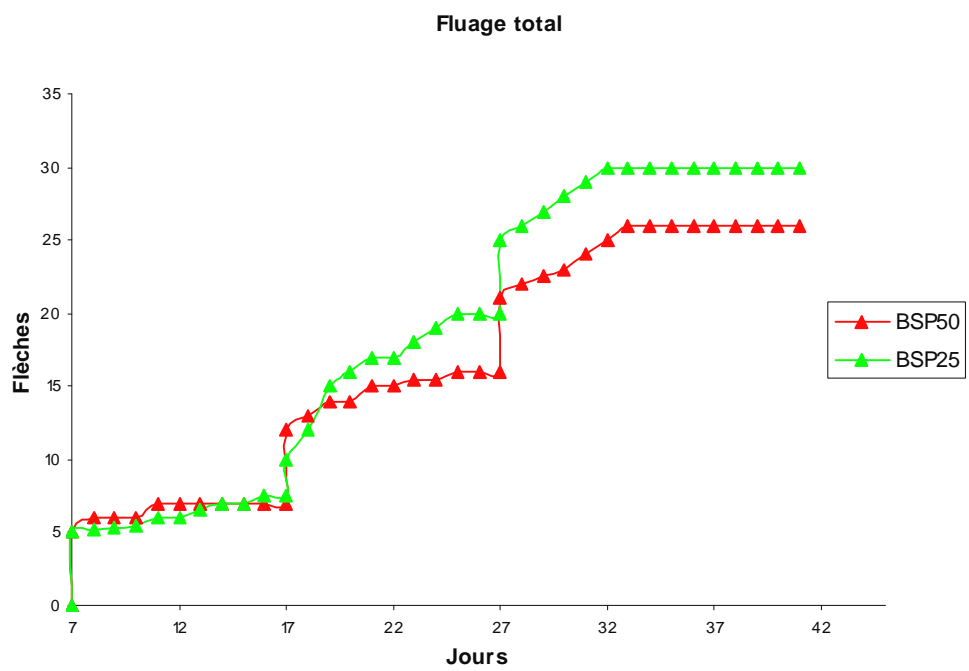
6.3.3.3 Sur le fluage total



Courbes 16. Fluage total des bétons de fibres (150 kg)



Courbes 17. Fluage total des bétons de fibres (50 % de la charge de rupture)



Courbes 18. Fluage total des bétons de fibres (150 kg par palier de 50 kg)

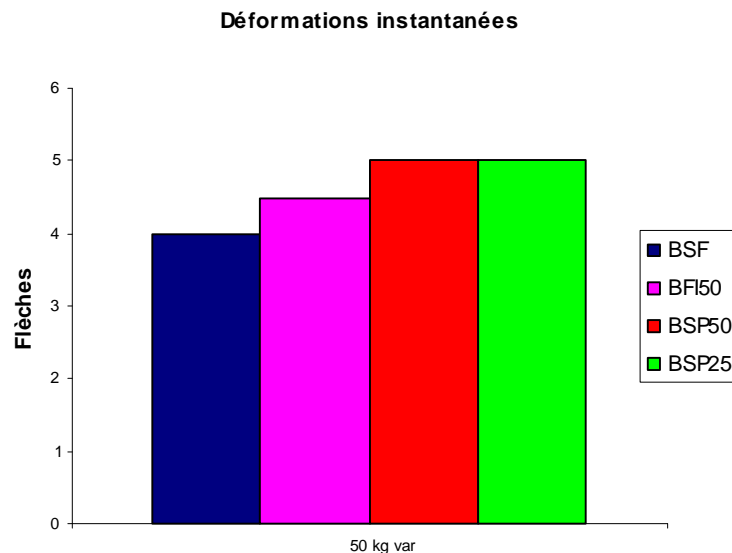
En établissant une comparaison entre le comportement différé des bétons renforcés par des copeaux métalliques, on constate :

- pour un chargement constant de 150 kg, les fibres SP25 se déforment plus et plus rapidement que les SP50. Le ressort le plus long permet une ductilité plus grande du matériau. Le chargement de 50% de la charge de rupture donnant la charge la plus élevée pour les BSP50, on ne peut que constater que ce qui a été remarqué précédemment, l'effet de proportionnalité entre charge et déformation. Les valeurs des déformations les plus faibles sont celles dues au chargement par palier, nous retrouvons un comportement quasi identique au fluage, ce qui s'explique par la création au niveau matériau d'un historique des contraintes au cours du temps et que le matériau se déforme en tenant compte de la déformation précédente. Il est intéressant de noter que des paramètres comme le retrait peuvent changer la réponse à la déformation pour chacun des mélanges. Il est donc très important d'en tenir compte dans le comportement différé d'un béton.

On peut donc affirmer que le comportement différé des BSP50 est plus intéressant que celui des BSP25.

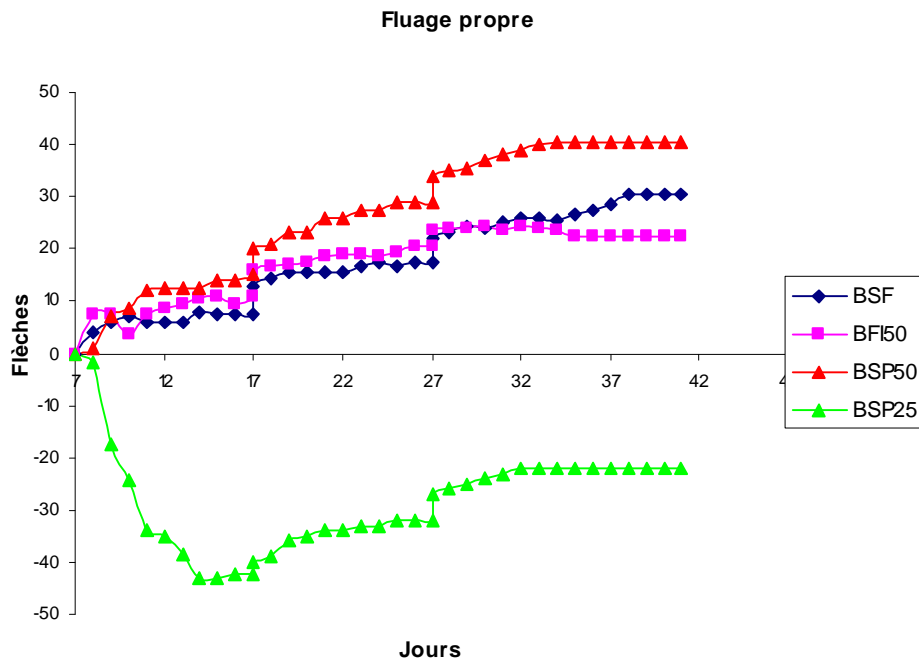
6.3.4 Influence du mode de chargement (croissant)

6.3.4.1 Sur la déformation instantanée



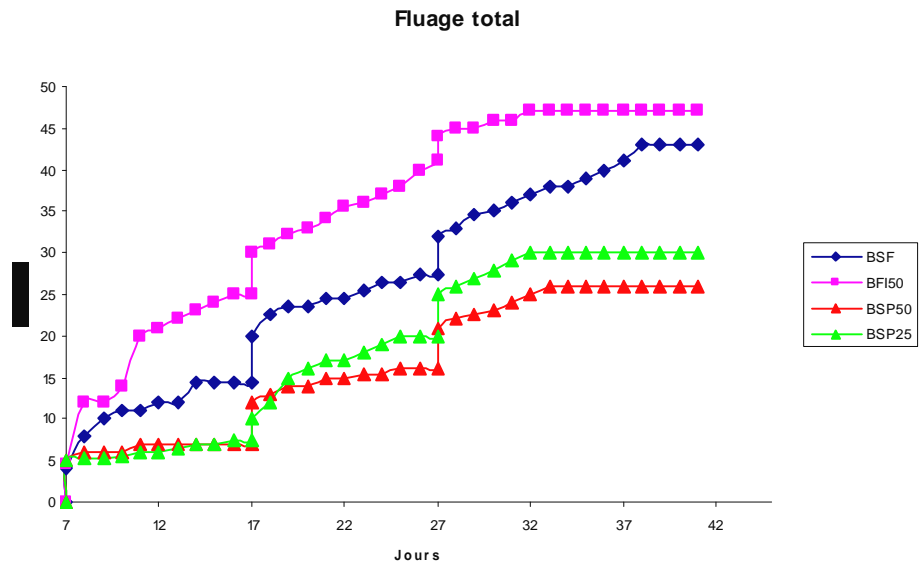
Histogramme 8. Déformations instantanées de l'ensemble des mélanges

6.3.4.2 Sur le fluage propre



Courbes 19. Fluage propre des bétons (150 kg par palier de 50 kg)

6.3.4.3 Sur le fluage total

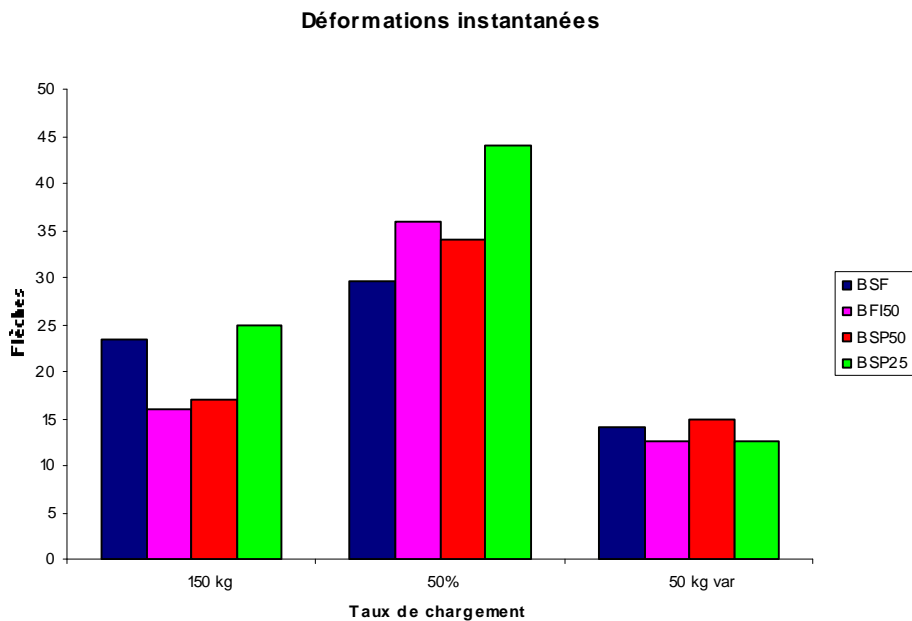


Courbes 20. Fluage total des bétons (150 kg par palier de 50 kg)

Dans le cas du taux de chargement variable, on remarquera que le fluage reste un phénomène vieillissant, plus le matériau est âgé, plus les déformations mesurées se stabilisent (linéarité de la courbe) entre un palier et un autre. Le matériau se comporte comme s'il " mémorise " la déformation précédente d'où la création d'un phénomène d'adaptation qui permet l'obtention d'une déformation moins importante que si la charge était maintenue constante durant la même période. On notera que les BSP50 ont un comportement intéressant si on s'intéresse uniquement au fluage total.

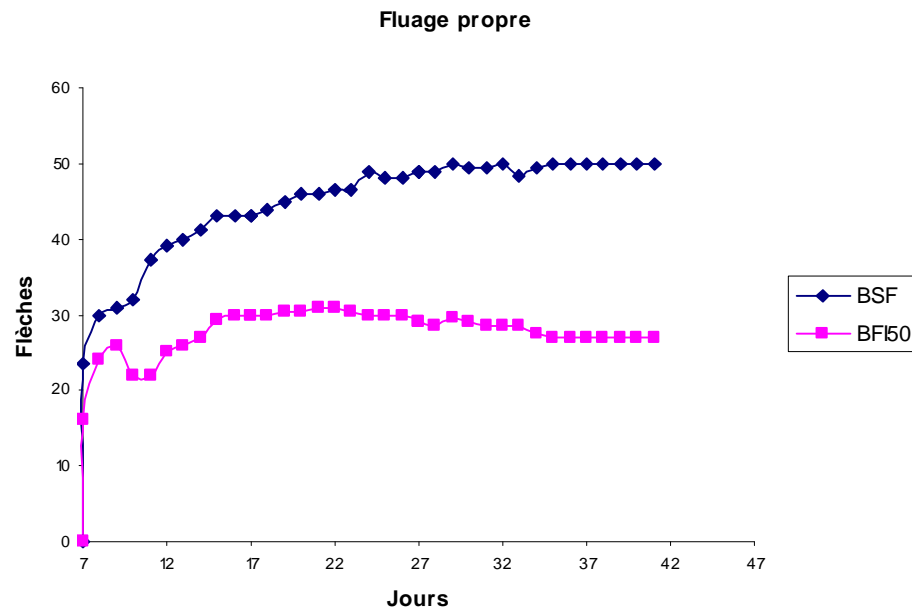
6.3.5 Influence de l'introduction des fibres

6.3.5.1 Sur la déformation instantanée

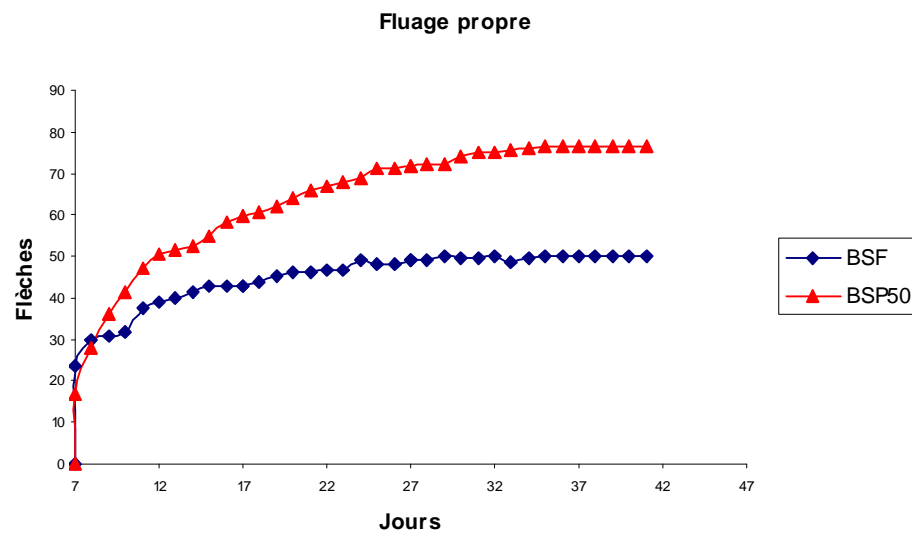


Histogramme 9. Déformations instantanées de l'ensemble des mélanges

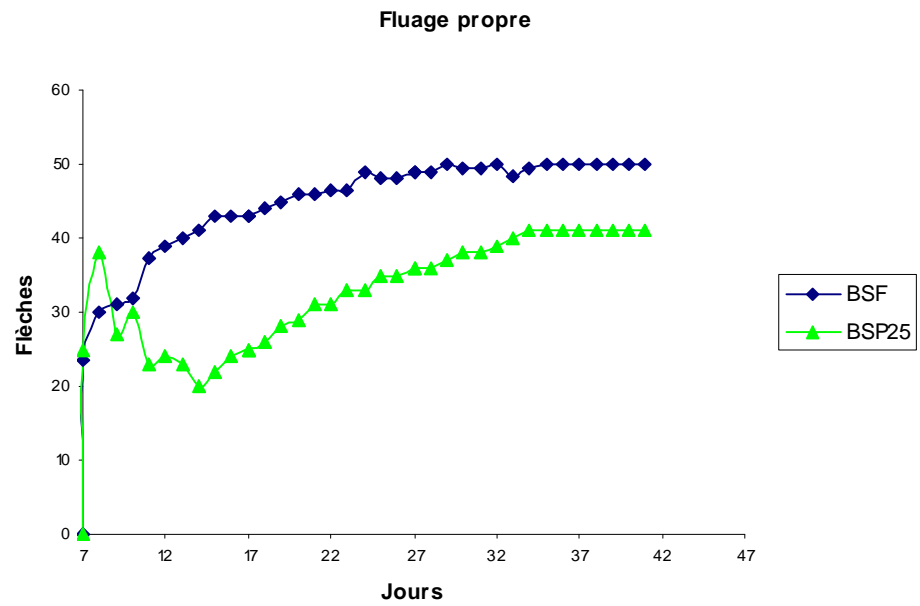
6.3.5.2 Sur le fluage propre



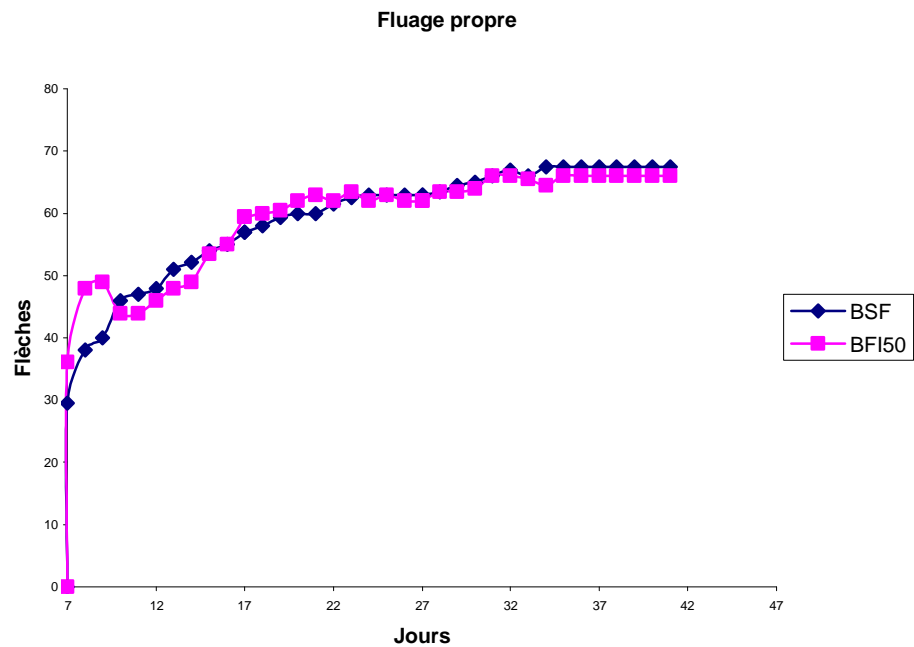
Courbes 21. Fluage propre de BSF et BFI50 sous charge maintenue (150 kg)



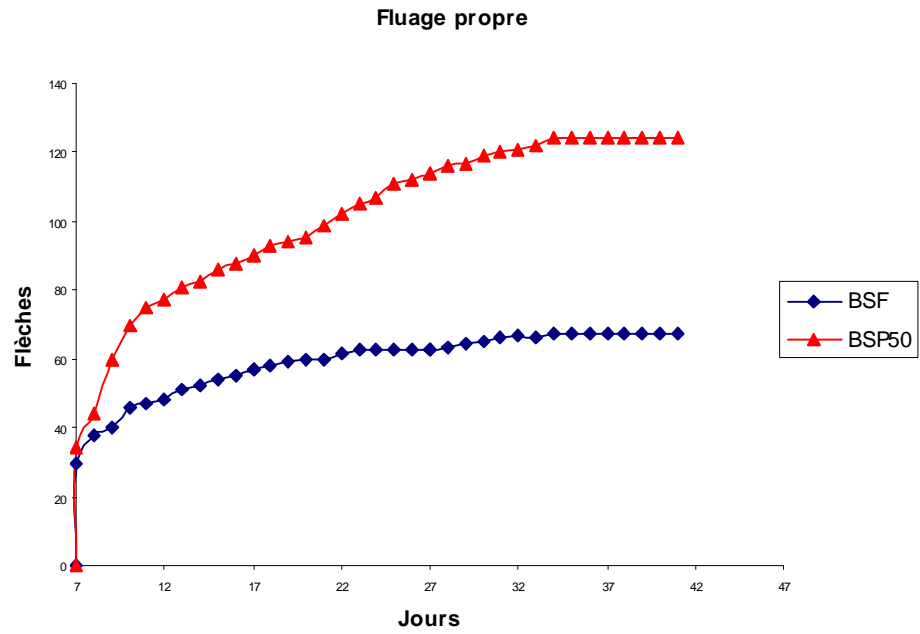
Courbes 22. Fluage propre de BSF et BSP50 sous charge maintenue (150 kg)



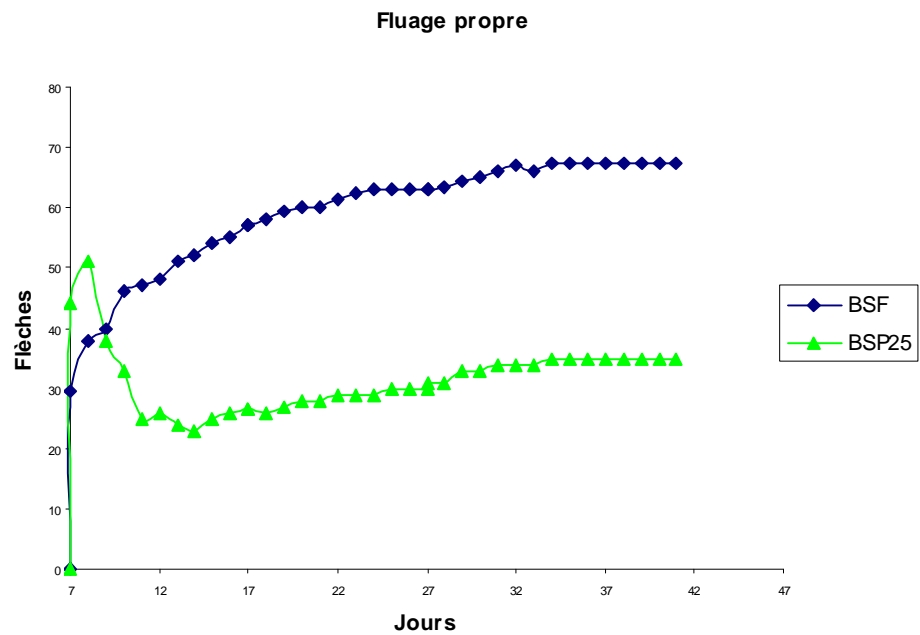
Courbes 23. Fluage propre de BSF et BSP25 sous charge maintenue (150 kg)



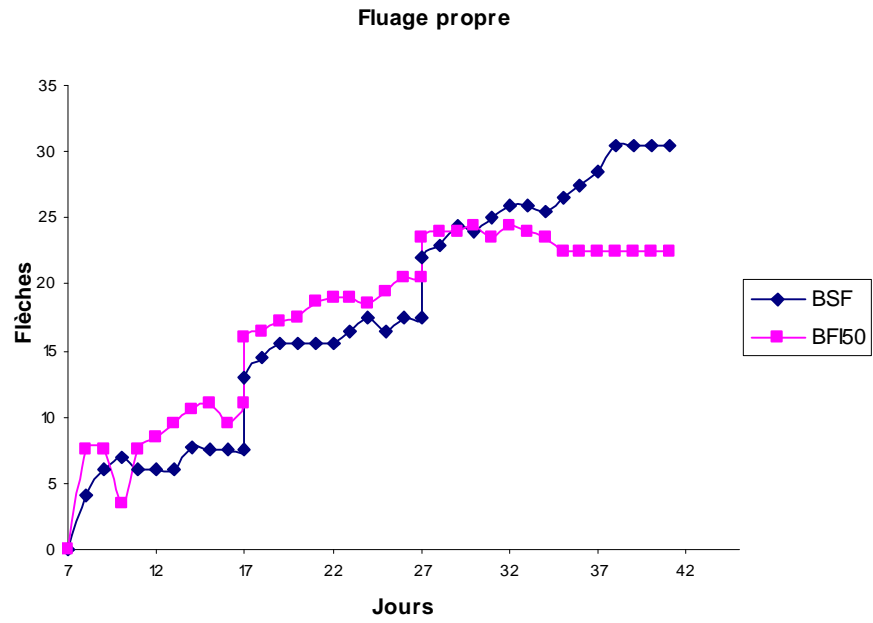
Courbes 24. Fluage propre de BSF et BFI50 (50 % de la charge de rupture)



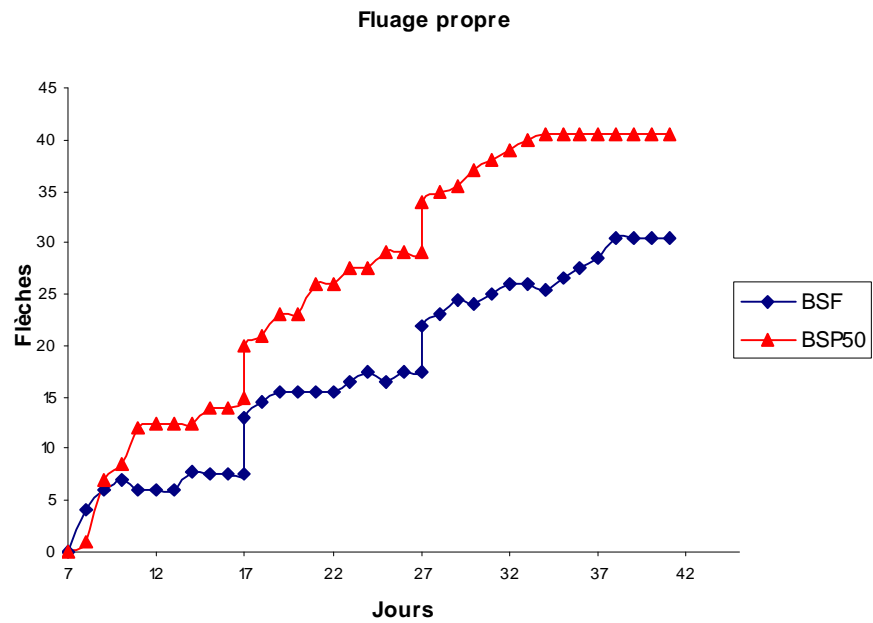
Courbes 25. Fluage propre de BSF et BSP50 (50 % de la charge de rupture)



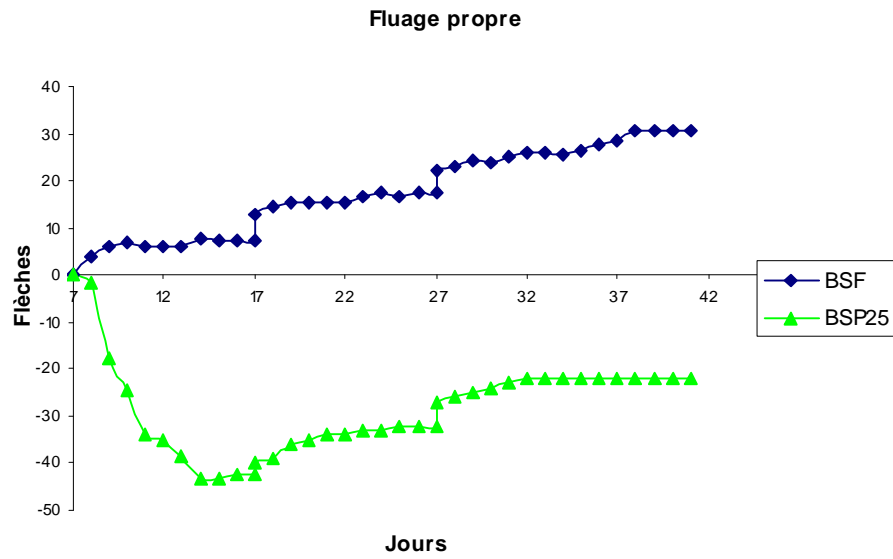
Courbes 26. Fluage propre de BSF et BSP25 (50 % de la charge de rupture)



Courbes 27. Fluage propre de BSF et BFI50 (150 kg par palier de 50 kg)

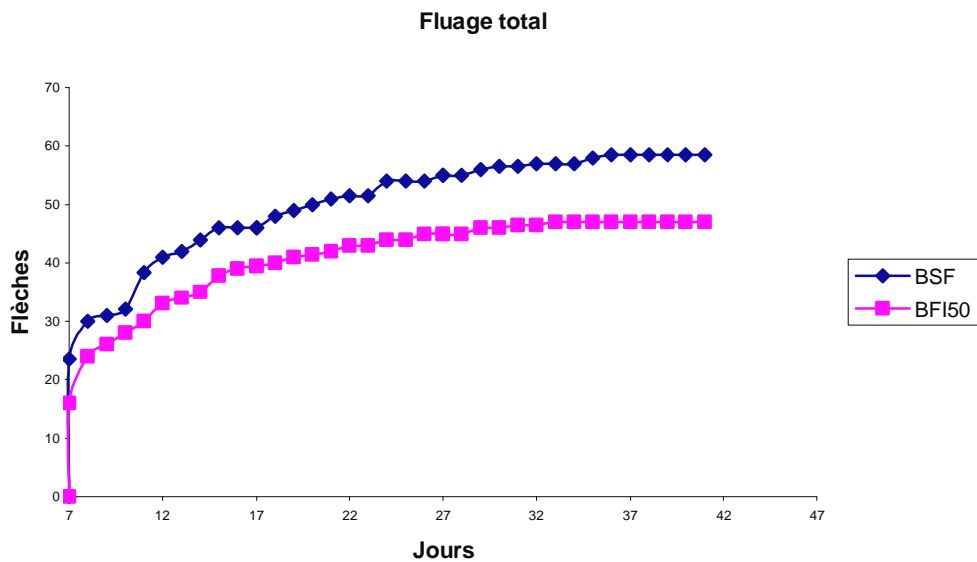


Courbes 28. Fluage propre de BSF et BSP50 (150 kg par palier de 50 kg)

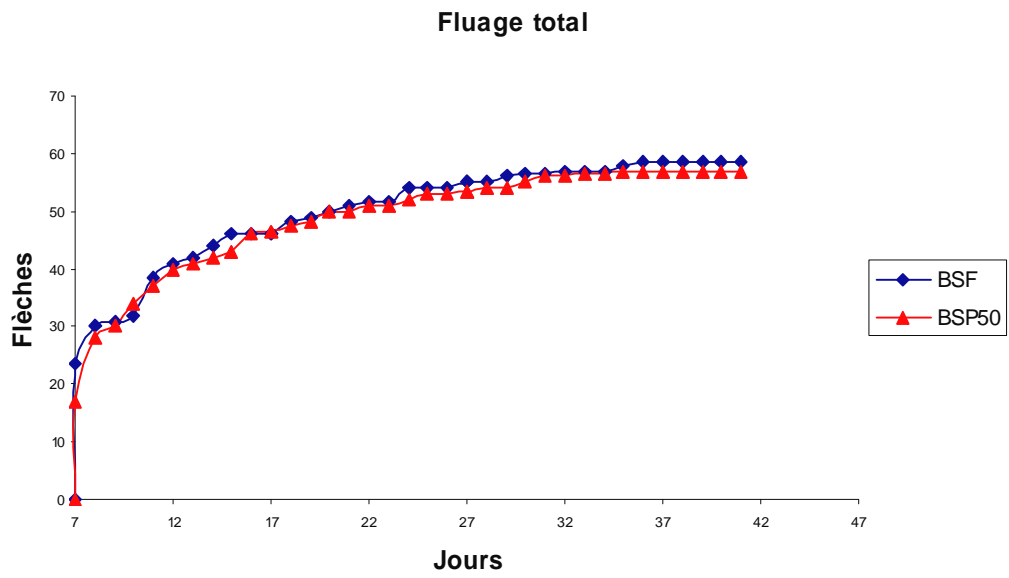


Courbes 29. Fluage propre de BSF et BSP25 (150 kg par palier de 50 kg)

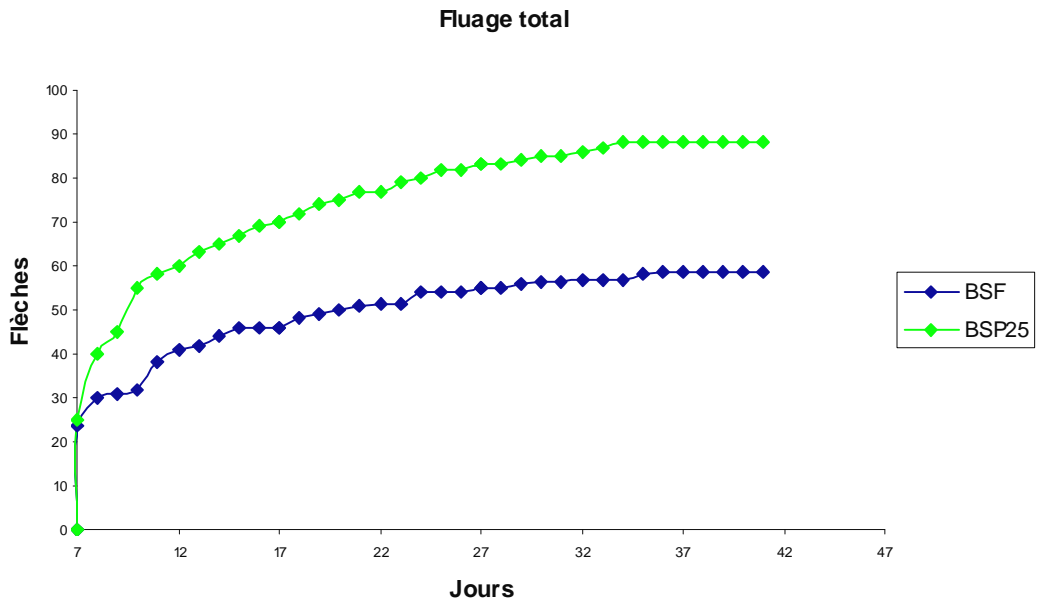
6.3.5.3 Sur le fluage total



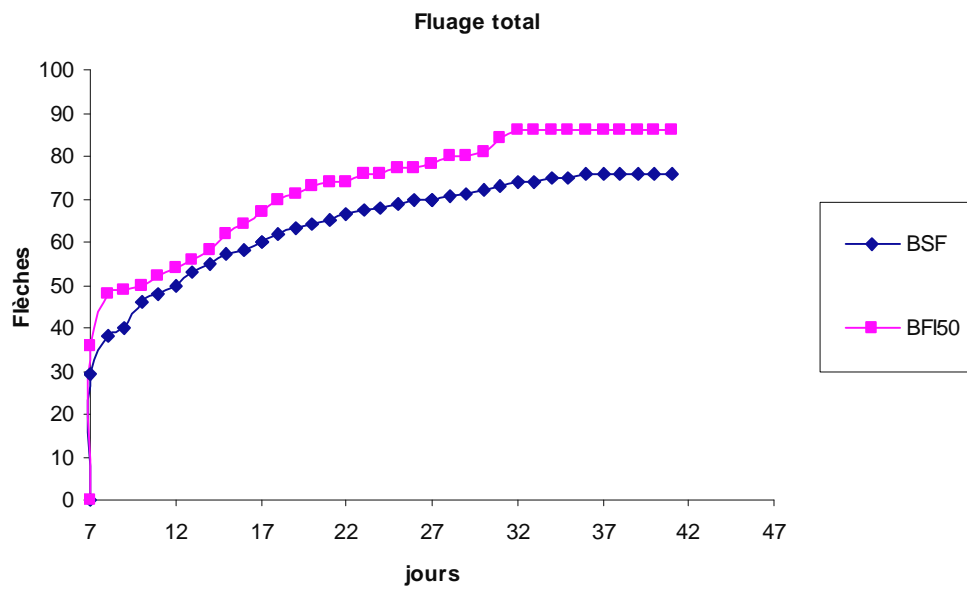
Courbes 30. Fluage total des BSF et des BFI50 sous 150 kg



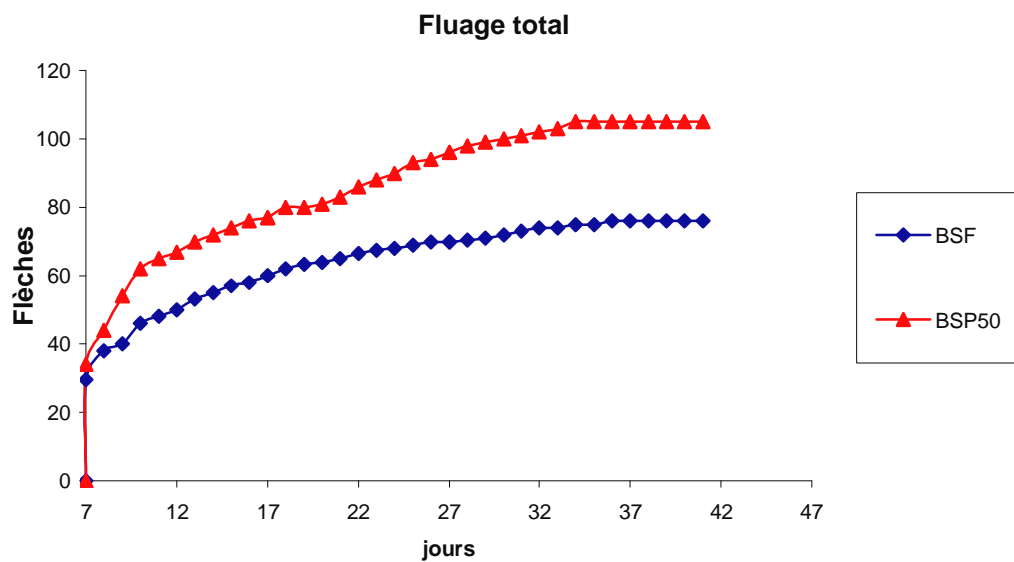
Courbes 31. Fluage total des BSF et des BSP50 sous 150 kg



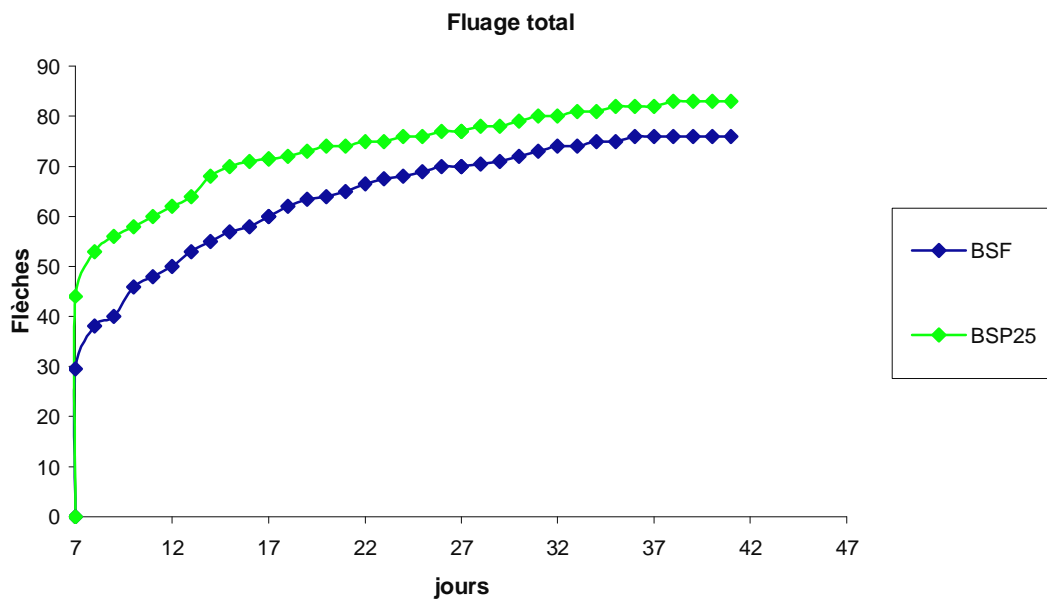
Courbes 32. Fluage total des BSF et des BSP25 sous 150 kg



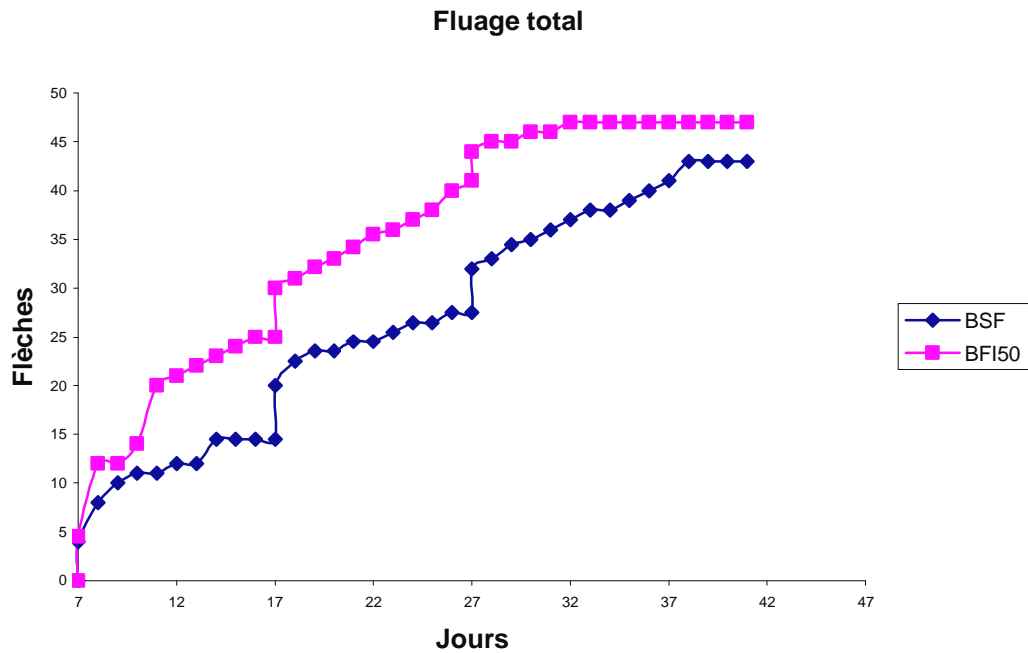
Courbes 33. Fluage total des BSF et des BFI50 sous 50% de la charge de rupture



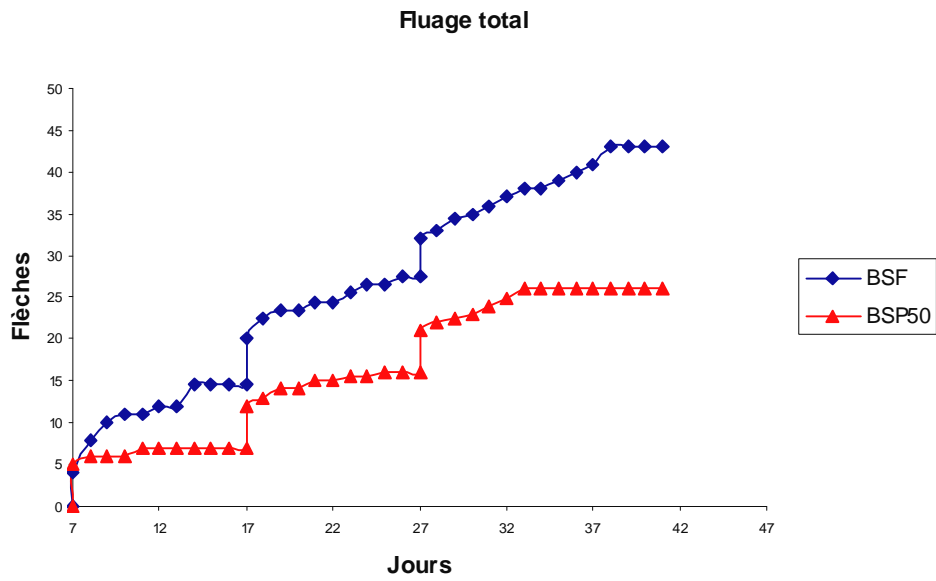
Courbes 34. Fluage total des BSF et des BSP50 sous 50% de la charge de rupture



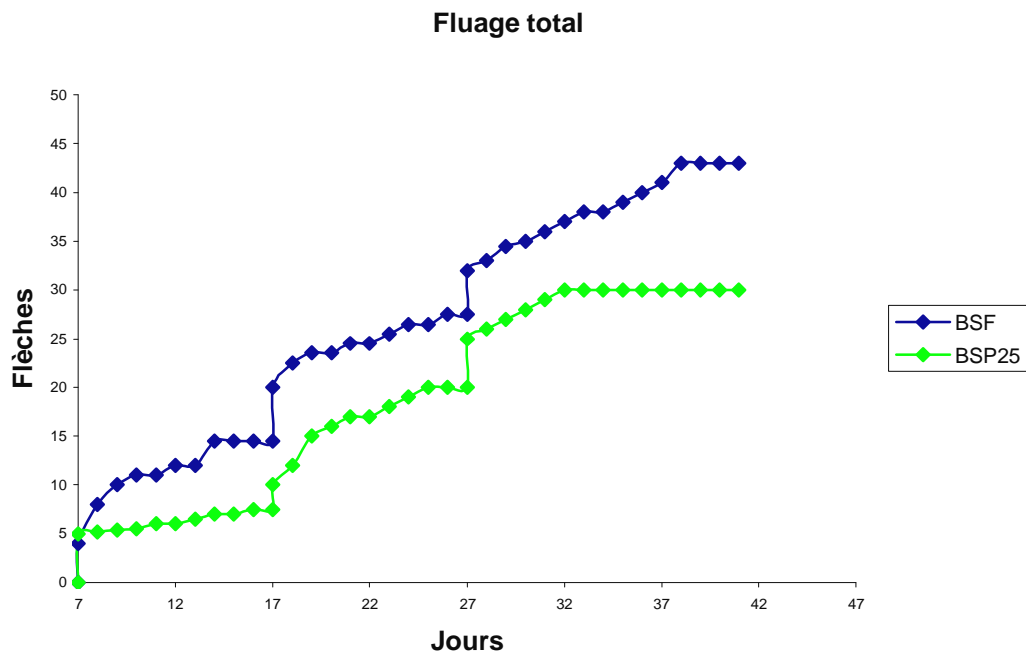
Courbes 35. Fluage total des BSF et des BSP25 sous 50% de la charge de rupture



Courbes 36. Fluage total des BSF et des BFI50 sous 150 kg par palier de 50 kg



Courbes 37. Fluage total des BSF et des BSP50 sous 150 kg par palier de 50 kg



Courbes 38. Fluage total des BSF et des BSP25 sous 150 kg par palier de 50 kg

A la lecture des résultats obtenus, il nous paraît nécessaire sinon essentiel d'optimiser le choix de la fibre (type, élancement, caractéristiques mécaniques) en fonction de la compacité de la matrice car pour chacun des bétons les résultats sont intéressants. Il suffit de changer la forme et l'élancement pour que l'on obtienne un panel de résultats assez étendu.

L'apport des fibres est une augmentation de la ductilité du matériau. La forme des copeaux métalliques est un paramètre important, elle permet une meilleure adhérence, donc une meilleure accommodation du matériau à la déformation. On peut noter que les BSP50 ayant une résistance à la traction la plus élevée, donnent une réponse au fluage la plus significative.

7. Discussions

Il y a peu d'informations sur l'effet des fibres sur le fluage. Les résultats d'une étude de fluage en flexion [R.N SWAMY and al, H. HOUARI] montrent que les déformations sont réduites. Egalement, les déformations de fluage sont plus petites dans la zone de compression que dans la zone en traction (tension), [H. HOUARI], parce que pour une charge de flexion donnée résulte dans le rapport contrainte / résistance est beaucoup plus élevée dans la zone de tension que dans la zone de compression. A partir de résultats des tests de fluage [J. EDINGTON] portés tout le long d'une période de charge de 12 mois, on trouve que l'addition de fibres d'acier ne réduit pas les déformations de fluage.

A l'inverse [BALAGURU] montre que le fluage du béton de fibres est plus élevé que celui du béton plein et il fait remarquer aussi que les déformations de fluage augmentent avec l'accroissement du rapport contrainte / résistance.

D'après STAVRIDES, le fluage sur des éprouvettes bétonnées horizontalement et vibrées extérieurement montre une considérable diminution comparée au fluage du béton plein. Cependant, aucune différence réelle n'était observée dans des éprouvettes bétonnées verticalement.

Selon [M. HACHEM] le fluage du béton de fibres est identique au fluage du béton témoin. La présence de fibres n'influe pas sur la déformation à long terme.

Notre étude a permis de décrire le comportement de poutrelles en béton renforcé de fibres d'acier, vis-à-vis des charges maintenues. Il ressort de l'analyse des résultats expérimentaux que :

- pour un même niveau de chargement la flèche tend à diminuer lorsque la résistance du béton augmente
- la résistance mécanique n'influe pas sur les déformations à long terme, ceci s'explique par la constance du comportement, lorsqu'on passe des bétons ordinaires aux bétons renforcés des fibres métalliques.
- L'efficacité des fibres est maintenue aussi bien sous sollicitations statiques que permanentes.

8. Microstructure

8.1. Introduction

La microscopie électronique à balayage permet la réalisation d'une analyse élémentaire par détection de l'énergie des rayons X émis. Le fort grandissement et la profondeur de champ très importante de cette technique d'analyse permettent de former des images des surfaces rugueuses ou lisses avec un grand pouvoir de résolution. L'observation d'échantillons isolants nécessite une métallisation de l'échantillon qui permet de le relier à la masse avec une colle conductrice qui permet d'évacuer les charges et de la fixer sur le porte échantillon. Les observations ont été faites avec un microscope électronique à balayage de l'université d'Amiens et pratiquées sur des échantillons préalablement découpés en cube de un centimètre de côté. Les essais ont déterminés la composition chimique des échantillons et ont montré l'adhérence entre fibre et matrice. Des photos illustrant les résultats sont données au prochain paragraphe.

Une analyse structurelle des bétons a montré que leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la présence de défauts de structure. Plusieurs types de défauts se différenciant par leur taille peuvent être observés dans ces bétons lorsqu'ils sont soumis à des charges mécaniques.

A l'échelle la plus faible, on observe le défaut dit de microporosité du béton. Il s'agit de pores, dits capillaires, issus des espaces inter granulaires initialement présents dans la pâte fraîche. Leur taille varie entre 50 nm et quelques μm

A l'échelle suivante, on observe les défauts de microfissuration. Il s'agit de microfissures présentant des ouvertures allant de 1 à quelques centaines de μm . Elles sont non coalescentes, c'est-à-dire qu'elles ne forment pas un chemin continu à travers la structure. Elles sont principalement dues au caractère hétérogène du béton, les granulats présentant

des propriétés mécaniques et physiques différentes de celles du liant/ciment. Elles apparaissent lors de chargement mécanique. Ce type de défaut est un responsable majeur des faibles propriétés mécaniques du béton en traction et de son caractère fragile.

A la dernière échelle, on observe les défauts de macro fissuration. L'ouverture de ces fissures varie de quelques centaines de μm à quelques mm. Ces fissures sont coalescentes.

On peut également observer des défauts majeurs de taille millimétrique qui sont dus à une mauvaise préparation du béton (air occlus, défauts de remplissage).

Nous présentons quelques photos illustrant les résultats obtenus après observation au MEB. Nous les classons par type de béton utilisé.

8.2.BSF

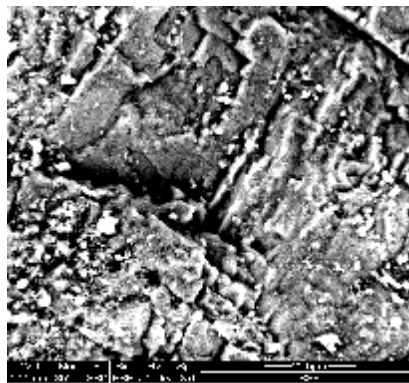


Photo 2.

Les BSF présentent une porosité importante qui se traduit par la présence de points noirs sur la photo. (air occlus)

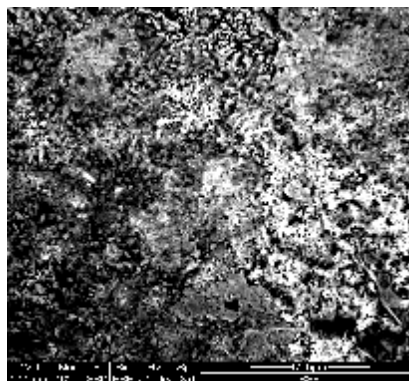


Photo 3.

Sur cet échantillon un réseau de microfissuration est visible. On observe une porosité importante.

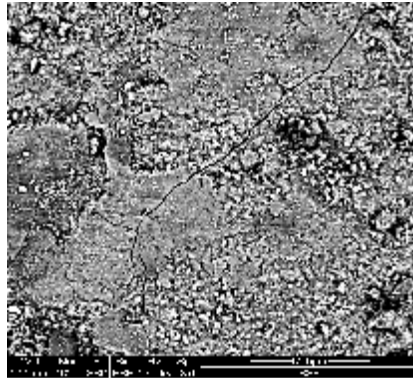


Photo 4.

Les microfissurations sont plus nettes et probablement dues au retrait. Les grosses tâches noires sont des impuretés qui proviennent en général de la qualité de l'eau utilisée. (Composition chimique)

8.3.BFI50

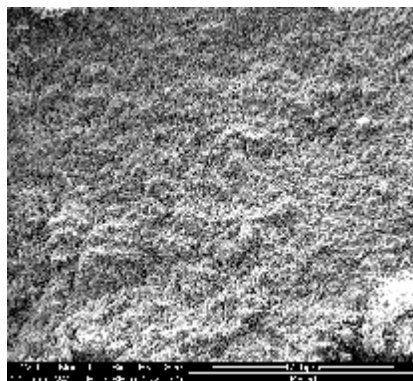


Photo 5.

On remarque que le béton ne présente pas de vides comme les BSF, la porosité est plus faible.

La présence de l'échantillon de fibre n'est pas observable. Cela est peut être du soit à l'absence suite à la coupe (dimension de l'échantillon 1x1x1 cm), les fibres sont disposées

de façon aléatoire dans le matériau, soit à la capacité de la pénétration du balayage (intensité du rayonnement).

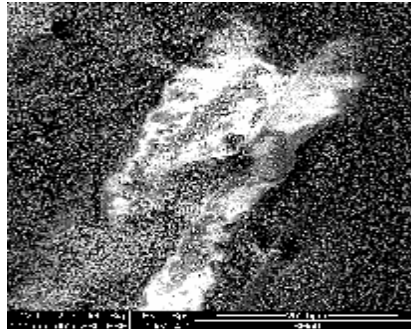


Photo 6.

La partie blanche représente un grain de calcium. Le MEB permet de déterminer la composition chimique de la matrice.

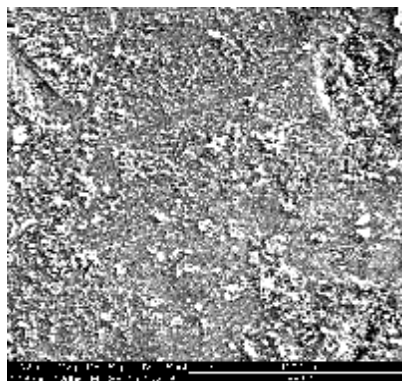


Photo 7.

L'échantillon présente une forte concentration de calcium. La microfissuration n'est pas visible, le matériau est relativement homogène, il présente une surface assez uniforme.

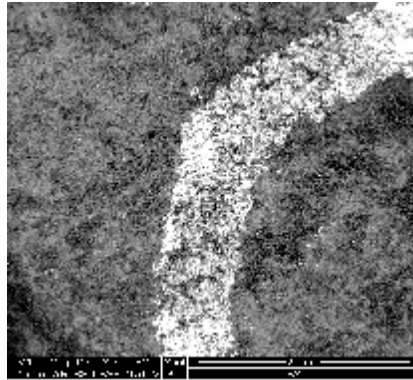
8.4.BSP50

Photo 8

La présence de la fibre est nettement distincte. On peut noter que la forme de la fibre permet une bonne adhérence avec la matrice.

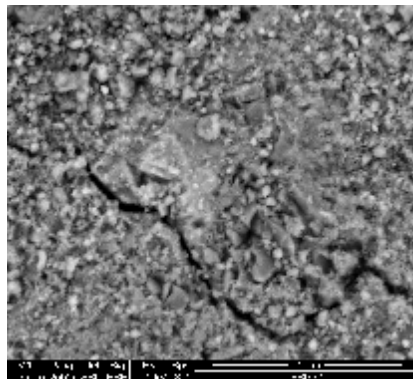


Photo 9.

La porosité est plus importante que pour les BFI50. Les microfissures que l'on peut voir sont dues à l'opération de coupe de l'échantillon, elles sont situées sur l'extrême bord de l'échantillon.

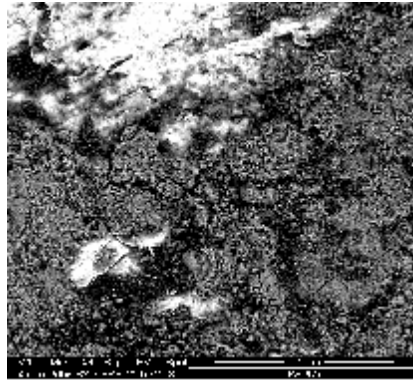


Photo 10.

Pour cet échantillon on observe que nous n'avons pas la même homogénéité que pour les BFI50. Les parties blanches représentent des grains de calcium, on constate aussi la présence de potassium, de magnésium.

8.5. BSP25

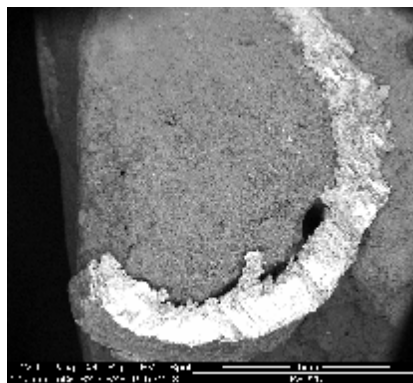


Photo 11

L'adhérence fibre – matrice est quasi parfaite. On observe également un décollement de la fibre due à l'opération de coupe mécanique de l'échantillon.

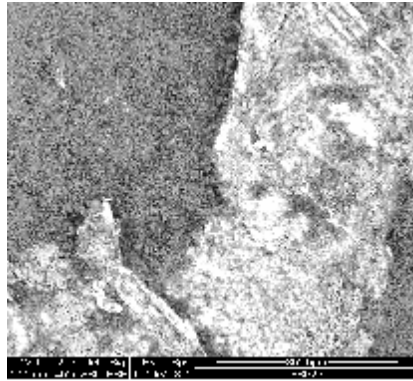


Photo 12.

Cette photo montre l'adhérence fibre – matrice pris dans un autre échantillon et confirme ce qui a été vu sur la photo précédente. Les petits points noirs observés représentent des vides, la porosité pour les BSP25 est relativement importante.

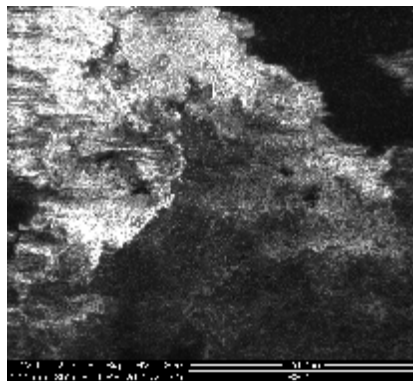


Photo 13.

Cette photo représente l'extrémité de l'échantillon, les traces blanches sont des agglomérats de calcium. On observe la structure accidentée d'un dé de béton de un centimètre cube.

9. Synthèse

L'étude faite sur MEB, n'a pas été très approfondie, elle a été réalisée pour accompagner les résultats des essais de fluage et se faire une idée de ce que subit un échantillon suivant

le type de renfort utilisé. Les résultats du MEB confirment ce que nous avons pu obtenir en traçant les courbes charges – flèches des différents bétons.

L'incorporation de fibres dans les mortiers et bétons permet d'obtenir des matériaux possédant une certaine ductilité. Elle permet aussi de maîtriser dans une certaine mesure la fissuration et elle un facteur de la durabilité du matériau. La maîtrise de la fissuration est possible grâce aux efforts de pontage transmis par les fibres aux surfaces de fracture. En effet, les fibres dispersées de façon aléatoire retardent la croissance des fissures et limitent leurs ouvertures grâce aux efforts de pontage. Au-delà des considérations purement mécaniques, l'intérêt de ces ajouts est aussi l'amélioration de la durabilité des bétons. Par exemple, on peut envisager l'ajout de fibres (métalliques le plus souvent) dans le béton pour maîtriser la fissuration. Cette restriction de l'ouverture des fissures constitue une avancée dans un souci de développement durable.

10. Conclusion

Le béton présente un caractère fragile et la dégradation de ce matériau est liée à des processus de fissuration. Le développement d'une fissure fait apparaître des déformations irréversibles, une perte de rigidité, et une localisation des déformations au niveau des zones endommagées.

Dans le cadre d'un essai de flexion, la partie supérieure de la poutre est en compression et la partie inférieure est en traction. La contribution des déformations de retrait est donc plus importante en fibre supérieure qu'en fibre inférieure, expliquant de ce fait l'effet observé au niveau des déplacements. Dans ce contexte, l'influence du retrait est plus marquée pour des niveaux de chargements plus élevés, pour lesquels des fissures sont instantanément créées en fibres tendue dès la mise en charge, annulant de ce fait la contribution de retrait en partie inférieure de la poutre.

Ce qui est contradictoire avec nos résultats obtenus pour les BSP25, où les déformations de fluage, sont les plus importantes sauf si c'est le matériau qui se fissure le moins vite par rapport aux autres bétons. Par contre, pour les BSP50, où le retrait est positif donc on a obtenu un gonflement, l'explication d'une microfissuration importante entraînant ce phénomène est à étudier.

D'une manière générale, la contribution des déformations de fluage est plus importante que celle des déformations de retrait vis-à-vis des déplacements calculés, elle s'avère en

revanche beaucoup plus discrète dans l'évolution de la fissuration de la poutre. Celle-ci est essentiellement pilotée par les déformations de retrait en partie supérieure de la structure qui génèrent une évolution significative de l'endommagement.

Il me semble que pour expliquer les phénomènes régissant les résultats des courbes il faut :

- prendre en compte une éventuelle réponse mécanique au comportement hydrique du matériau
- tenir compte de l'évolution de la microfissuration pour expliquer les transferts d'humidité à l'échelle microscopique.
- les copeaux métalliques ayant la même forme que les particules de ciments, cela permet une meilleure circulation de l'eau à l'intérieur du matériau.
- Les microfissures permettent le transfert de l'eau et rendent le matériau plus ductile.
- La forme des fibres est un paramètre important qui influe sur le comportement différé du matériau. Elle permet une meilleure accommodation du matériau à la déformation.
- La forme des fibres permet une meilleure cohésion et une meilleure adhérence avec le béton pour les BSP50, les BSP25 que pour les BFI50.

REFERENCES**[1] BERTHOLLET A.**

« Modélisation du mécanisme du fluage tertiaire par observation de l'effet de vitesse sur le comportement du béton. » XXI èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil- Prix « René HOUPERT. » Octobre 2003. p. 31-38.

[2] GERARD BERNIER.

« Caractérisation et contrôle des bétons renforcés de fibres. » Annales de l'ITBTP n°494. Juin 1991. Série 280.

[3] GERARD BERNIER

« Caractérisation et contrôle des bétons renforcés de fibres. » Annales de l'ITBTP n°494, Juin 1991, Série 280.

[4] Sous la direction de F. DE LARRARD.

« Construire en béton. » Collection du LCPC. 2002.

[5] CHABANE A.

« Contribution à l'étude du comportement différé des bétons sous sollicitation de flexion. » Thèse soutenue en Octobre 2000.

[6] FRANCOIS D., PINEAU A., ZAOUI A.

« Comportement mécanique des matériaux. » Elasticité et plasticité. Editions HERMES.1995.

[7] AL MANASEER A.A

« Creep and shrinkage : structural design effects. » The Adam Neville Symposium (1997, Atlanta, USA), ACI Michigan Farmington Hills, 2000, 424 p.

[8] AIT ALI M., PINGLOT M., LORRAIN M.

« Modélisation du comportement en flexion statique des sections rectangulaires en béton armé. » Matériaux et Constructions. 1993. Vol.26, p.207-213.

[9] ALTOUBA S.A., LANGE D.A.

« Creep and shrinkage and cracking of restrained concrete at early age. » ACI Materials Journal, 2001, Vol.98, n°4, p.323-331.

[10] ROSSI P.

« Les bétons de fibres métalliques. » Presses de l'ENPC. Juin 1998.309 p.

[11] WITASE R.

« Contribution à la compréhension du comportement d'une coque d'aéroréfrigérant vieilli : définition d'un état initial, influence des effets différés sous sollicitations hydromécaniques. »

Thèse de doctorat soutenue le 22 décembre 2000. INSA de Lyon.

[12] BERTHOLLET A.

« Contribution à la modélisation du béton vis-à-vis du vieillissement et de la durabilité : interaction des déformations de fluage et du comportement non linéaire du matériau. »

Thèse de doctorat soutenue le 29 Octobre 2003. INSA de Lyon.

Depuis le début du 20^{ème} siècle, le béton s'est imposé comme matériau de base dans de nombreuses constructions (bâtiments, ouvrages d'art, etc.). Dès lors, différents phénomènes mal appréhendés initialement, ont conduit à la recherche systématique des mécanismes élémentaires et leur interaction.

L'intérêt croissant pour les nouveaux bétons et leur utilisation dans beaucoup de domaines du génie civil, a fait que nous avons voulu apporter une nouvelle approche pour la conception d'un nouveau produit consistant en un béton renforcé de fibres métalliques recyclées. Ces copeaux se trouvant être des déchets de l'industrie locale. Pour améliorer les solutions technologiques existantes en termes de volume, de poids et de résistance, nous avons réaliser une fiche technique de ces bétons faisant une étude de caractérisation avec une comparaison avec un béton sans fibres et un béton renforcé de fibres commercialisées.

Dans la première partie, nous avons donné une idée exhaustive sur la composition, la formulation, les différentes résistances des bétons renforcés de fibres métalliques et une évaluation très générale du retrait et du fluage des bétons.

Aussi bien en termes de volume qu'en termes de finances, les bétons constituent les matériaux les plus utilisés dans le bâtiment. Essentiellement, les bétons sont confectionnés au départ de gravier, de sable, de ciment et d'eau. Mais à part ces quatre composants fondamentaux, les bétons actuels contiennent de plus en plus d'additifs et d'adjuvants. Ces derniers permettent de modifier les caractéristiques des bétons de telle manière que ceux-ci, même si la dénomination « béton » reste d'application, peuvent être considérés comme des matériaux nouveaux. Les évolutions au niveau du matériau béton ont entraîné de nouvelles applications dont l'impact ne peut être sous estimé.

Le deuxième chapitre est l'établissement d'une fiche « d'identification » ou de caractérisation des quatre mélanges utilisés. Les résultats obtenus permettent d'établir une comparaison du point de vue composition des mélanges, du point de vue résistances à la compression, à la traction et à la flexion des bétons. Il en ressort que notre béton armé de copeaux métalliques SP50, donne des résultats très satisfaisants

et permet d'être optimiste quand à son domaine d'application. La caractérisation des bétons utilisés pour notre recherche est indispensable pour l'obtention d'un matériau ayant la maniabilité adéquate permettant une bonne mise en œuvre des poutrelles 10x10x120xcm. La détermination des différentes résistances permet d'avoir une idée sur le comportement des différents bétons en fonction des renforts introduits. L'intérêt de ce chapitre est définir une fiche technique ou « carte d'identification » du matériau. Comme nous travaillons sur un matériau nouveau de part l'introduction de fibres issues du recyclage, la caractérisation mécanique est, nous semble-t-il un passage obligé pour continuer l'étude comparative. Cela nous amène à poursuivre en nous intéressant au comportement statique des matériaux utilisés ce qui permettra d'avoir plus de renseignements quant au fonctionnement et à la valorisation des bétons renforcés de différentes fibres.

Le troisième chapitre établit que les nombreuses recherches effectuées pour une bonne mise en œuvre et l'utilisation des BRFM, font apparaître que cet objectif ne peut être atteint qu'en jouant sur les paramètres qui conditionnent les caractéristiques du béton. L'incorporation dans la composition du béton de fibres métalliques, constituées par des spirales apporte des améliorations notables dans les caractéristiques du béton. Les performances constatées ont été obtenues sans exiger un choix particulier de ciment, ni des granulats naturels issus de concassage. Les résistances relativement élevées des BSP50 à court terme de ce matériau, permettent de penser qu'il pourrait convenir tout particulièrement dans la fabrication des éléments de faible épaisseur, avec une grande durée de service sans entretien ni réparation. Par ailleurs, les BRFM présentent des améliorations notables de comportement vis-à-vis de la fissuration et que l'ajout de tels renforts a pour conséquence la modification du comportement du béton, alors qu'un béton sans fibres casse de manière fragile.

Les courbes efforts – déformations (flèches) obtenues lors des essais de flexion quatre points sur des corps d'épreuves prismatiques de dimensions 10x10x120 cm font apparaître des résistances à la flexion à 7 jours améliorées, une énergie à la rupture supérieure à celle du béton témoin, un comportement très différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.

La courbe moyenne charge – flèche obtenue par l’essai monotone donne des informations sur l’endommagement du matériau sous sollicitation mécanique. Cette dernière est utilisée comme référence pour définir des seuils d’endommagement. Une partie linéaire sur la courbe est observée, puis des phénomènes non linéaires apparaissent. Ils correspondent à une localisation de l’endommagement sur une ou plusieurs fissures. Sur les courbes, il est possible de repérer la limite de linéarité qui est supposée correspondre à la première fissure.

Le dernier chapitre est une étude sur le comportement différé des différents bétons utilisés dans notre recherche. Le béton présente un caractère fragile et la dégradation de ce matériau est liée à des processus de fissuration. Le développement d’une fissure fait apparaître des déformations irréversibles, une perte de rigidité, et une localisation des déformations au niveau des zones endommagées. Dans le cadre d’un essai de flexion, la partie supérieure de la poutre est en compression et la partie inférieure est en traction. La contribution des déformations de retrait est donc plus importante en fibre supérieure qu’en fibre inférieure, expliquant de ce fait l’effet observé au niveau des déplacements. Dans ce contexte, l’influence du retrait est plus marquée pour des niveaux de chargements plus élevés, pour lesquels des fissures sont instantanément créées en fibres tendues dès la mise en charge, annulant de ce fait la contribution de retrait en partie inférieure de la poutre. Ce qui est contradictoire avec nos résultats obtenus pour les BSP25, où les déformations de fluage sont les plus importantes sauf si c’est le matériau qui se fissure le moins vite par rapport aux autres bétons. Par contre, pour les BSP50, où le retrait est positif donc on a obtenu un gonflement, l’explication d’une microfissuration importante entraînant ce phénomène est à étudier.

D’une manière générale, la contribution des déformations de fluage est plus importante que celle des déformations de retrait vis-à-vis des déplacements calculés, elle s’avère en revanche beaucoup plus discrète dans l’évolution de la fissuration de la poutre. Celle-ci est essentiellement pilotée par les déformations de retrait en partie supérieure de la structure qui génèrent une évolution significative de l’endommagement.

Il nous semble que pour expliquer les phénomènes régissant les résultats des courbes il faut :

- prendre en compte une éventuelle réponse mécanique au comportement hydrique du matériau
- tenir compte de l'évolution de la microfissuration pour expliquer les transferts d'humidité à l'échelle microscopique.
- les copeaux métalliques ayant la même forme que les particules de ciments, cela permet une meilleure circulation de l'eau à l'intérieur du matériau.
- Les microfissures permettent le transfert de l'eau et rendent le matériau plus ductile.
- La forme des fibres est un paramètre important qui influe sur le comportement différé du matériau. Elle permet une meilleure accommodation du matériau à la déformation.
- La forme des fibres permet une meilleure cohésion et une meilleure adhérence avec le béton pour les BSP50, les BSP25 que pour les BFI50.

L'étude faite sur MEB, n'a pas été très approfondie, elle a été réalisée pour accompagner les résultats des essais de fluage et se faire une idée de ce que subit un échantillon suivant le type de renfort utilisé. Les résultats du MEB confirment ce que nous avons pu obtenir en traçant les courbes charges – flèches des différents bétons.

RESUME :

Le travail présenté a pour point de départ une étude sur l'influence de l'introduction des fibres métalliques dans une matrice cimentaire. Pour ce faire, nous avons abordé notre recherche en apportant en plus de fibres métalliques commercialisées, des fibres provenant de déchets métalliques industriels. Nous avons du, au préalable établir une fiche d'identification pour les quatre mélanges utilisés et qui sont un béton sans fibres servant de béton témoin, un béton renforcé de fibres métalliques commercialisées et deux bétons renforcés de copeaux métalliques. Les copeaux ont la même forme mais pas le même élanement.

L'étude expérimentale a été menée sur plusieurs corps d'épreuve de caractéristiques géométriques adaptées aux essais effectués. Les performances constatées ont été obtenues sans passer par un choix particulier de ciment ou de granulats naturels issus de concassage. Il nous semble important de noter que tous les matériaux utilisés sont des matériaux locaux (région de Constantine), y compris les renforts recyclés.

Nous avons étudié deux comportements sur des poutrelles de 10x10x120 cm, un comportement monotone et un comportement différé. Sous sollicitation statique, les courbes efforts – déformations (flèches) obtenues lors des essais de flexion 4 points, font apparaître des résistances à la flexion à 7 jours améliorées, une énergie à la rupture supérieure à celle du béton témoin, un comportement différent à la fissuration entraînant un retard notable à la ruine.

La prédiction des déformations différées est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton. Les déformations de fluage ont été déterminées pour les quatre mélanges et ont permis de constater que l'influence du taux de chargement sur l'importance de la déformation est prépondérante pour tous les bétons. L'influence du vieillissement sur la réponse au fluage se traduit par une diminution notable de la déformation quand on charge progressivement. La forme et l'élanement des fibres ont un impact reconnu sur les déformations.

D'après les résultats obtenus, les fibres SP50 permettent une ductilité plus grande du matériau par rapport aux autres mélanges. Leur comportement est plus intéressant que celui des BFI50 et des BSP25.

Une étude sur MEB a permis d'établir quelques commentaires sur l'adhérence renfort – matrice et sur la porosité des différents mélanges.

L'option du choix des renforts nous permet de nous inscrire dans une démarche de développement durable en termes d'économie et d'environnement. Il serait intéressant de mettre en place un recensement de matériaux directement recyclables et utilisables dans les mêmes conditions qu'un produit normalisé, commercialisé pour un emploi similaire.

.....
Mots – clés : Béton - fibres métalliques – caractérisation – comportement monotone – fluage valorisation – recyclage.

ABSTRACT

The main purpose of this work is the study of metal fibres introduction on matrix based cement. For our research approach, we bring in addition to metal commercializing fibres, metal industrial shaving. In first, an identification card for the four mixes have been done, which are a referencing concrete without fibres, a standard metal concrete reinforced and two of metal shaving reinforced concretes. The using industrial wastes have the same shape but not the same twinge.

The applied study has made on many tests pieces with geometrical properties fitting to the executing tests.

The performances noted are obtained without particular choice for cement or natural crushing aggregates. It is important to observe that all the using materials are local materials (Constantine area), including the recycling fibres.

We study two kinds of behaviour: a monotonous one and a time delayed one of girders (10x10x120 cm). Under static sollicitation, the load – bending curves (4 points flexion test) give improving bending strength at 7 days, a breaking energy higher than the referring concrete, a different cracking behaviour which makes an appreciable delay of decay.

The deferred deflection prediction is very important for concrete structure durability and long dated running capacity.

The creep deflections were definite for all the mixes and we establish the significant level loading influence for all of the concretes. The maturing influence on the creep response is a significant decreasing of the deflection when we load progressively. The shape and twinge fibre have an appreciable influence on the deflection.

Under the results obtained, the SP50 fibres permit a higher ductility than the others fibres. Their behaviour is more interesting than the BFI50 and BSP25 one. We make some study MEB annotation on the fibre – matrix grip and on the different mixes porosity.

The reinforcement choice option is important to enter in lasting development step in economical and environmental terms. It will be interesting to make recycling materials counting for a similar using in the same conditions than a standardized and commercialized product.

Key word: concrete, metal fibres, characterisation, monotonous behaviour, creep, valorisation, recycling.