

UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

N° d'ordre:.....

Série:.....



MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : **GÉNIE CIVIL**

Option : **Matériaux**

Présenté par

Benali redha

- Thème -

**ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE ET
RHEOLOGIQUE DE LA PATE DU CIMENT, MORTIER ET
BETON AVEC DIFFERENTES FIBRES**

Soutenu le :

Devant le jury:

- Président : **GUETTALA ABDELHAMID ProfeseurROFESSEUR** Université de Biskr
- Rapporteur : **Dr M. MELLAS** M.C Université de Biskra.
- Examineurs

SOMMAIRE

RESUME.....	I
ABSTRACT.....	I
ملخص.....	II
LISTE DES SYMBOLES.....	III
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PROBLEMATIQUE.....	2
OBJECTIFS VISES.....	3

CHAPITRE 1

NOTIONS SUR LES BETONS DE FIBRES

1.1. DEFINITIONS.....	04
1.1.1. Béton.....	04
1.1.2. Constituants et formulation du béton.....	04
1.1.3. Fibres.....	05
1.1.4. Béton de fibres.....	05
1.2. APERCU HISTORIQUE SUR BETON DE FIBRES.....	05
1.3. CARACTERISTIQUES, CHOIX ET ROLE DES FIBRES.....	10
1.3.1. Principales fibres utilisées.....	10
a) Fibres minérales.....	10
b) Fibres végétales.....	10
c) Fibres synthétiques.....	11
d) Fibres artificielles.....	11
1.3.1.1. Fibres d'amiante.....	11
1.3.1.2. Fibres de cellulose.....	11
1.3.1.3. Fibres de polypropylènes.....	12
1.3.1.4. Fibres de verre.....	13
1.3.1.5. Fibres métalliques.....	13
1.3.2. Critères de choix des fibres.....	14
1.3.3. Rôles des fibres dans le béton.....	16
1.4. FABRICATION DES FIBRES : CAS DES FIBRES D'ACIER.....	18
1.5. APPLICATIONS DU BETON RENFORCE DE FIBRES.....	21

CHAPITRE 2
LA RHEOLOGIE ET LES PROPRIETES MECANIQUES DU
BETON DE FIBRE

2.1. LA RHEOLOGIE DU BETON DE FIBRE.....	23
2.1.1. Introduction.....	23
2.1.2. Facteurs influents sur l'ouvrabilité de béton de fibres.....	24
2.1.2.1. La longueur et le dosage en fibres.....	25
2.1.2.2. La taille et la rugosité des granulats.....	26
2.1.3. La formulation de béton de fibres.....	27
2.1.4. Technique de mise en oeuvre du béton de fibre.....	30
2.2. PROPRIETES MECANIQUES DU BETON DE FIBRES.....	34
2.2.1. Introduction.....	34
2.2.2. Résistance en compression.....	36
2.2.3. Résistance en traction.....	37
2.2.4. Résistance en flexion.....	41

CHAPITRE 3
CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES ET LES
METHODES D'ESSAIS

3.1. INTRODUCTION.....	47
3.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES.....	47
3.2.1. Le Laitier	47
3.2.1.1. Analyse du laitier.....	47
3.2.1.2. Propriétés physiques de laitier.....	47
3.2.2. Le Ciment portland.....	47
3.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique du ciment.....	48
3.2.2.2. Propriétés physiques de ciment.....	48
3.2.3. Le filler calcaire.....	48
3.2.3.1. Propriétés physiques de filler calcaire.....	48
3.2.4. Le sable.....	49
3.2.4.1. Analyse granulométrique.....	49
3.2.4.2. Propriétés physiques de sable.....	49
3.2.5. Les Graviers.....	50
3.2.5.1. Propriété physique du gravier.....	51
3.2.6. Fibres métalliques.....	52
3.2.7. Fibres polypropylène.....	53
3.3. PLAN EXPERIMENTAL.....	53
3.3.1. La préparation des échantillons.....	53

CHAPITRE 4

ETUDE DE LA PÂTE DU CIMENT, MORTIER ET DU BETON

INTRODUCTION.....	54
4.1. ETUDE DE LA PATE DU CIMENT.....	54
4.1.1. La résistance à la compression.....	54
COMMENTAIRE.....	56
4.1.2. Propriétés physiques du liant.....	57
4.1.2.1. Consistance et prise.....	57
4.1.2.1.1. Influence de la quantité de filler et de laitier sur la consistance et la prise....	57
COMMENTAIRE.....	58
4.1.2.1.2. Le gonflement.....	59
COMMENTAIRE.....	60
4.1.3. Action des eaux agressives.....	60
COMMENTAIRE.....	62
SYNTHESE.....	63
4.2. ETUDE DU MORTIER.....	63
4.2.1. Comportement mécanique.....	64
4.2.1.1. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers normalisés.....	64
COMMENTAIRE.....	65
4.2.1.2. Influence de la quantité de laitier. Filler sur le comportement mécanique des mortiers.....	65
4.2.1-3.. Le retrait et le gonflement...	65
-Le retrait.....	65
-Le gonflement.....	66
COMMENTAIRE.....	68
COMMENTAIRE.....	71
4.3. ETUDE DE BETON.....	72
Les résultats d'essais.....	72
Interprétation des résultats.....	77
4.3.1. Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression.....	78
COMMENTAIRE.....	82
CONCLUSION GENERALE.....	84
RECOMMANDATIONS.....	86
BIBLIOGRAPHIE.....	87

INTRODUCTION GENERALE

Le béton existe dans la nature sous forme de poudingues calcaires et siliceux, mais c'est aussi un matériau qui est mis en œuvre par l'homme d'abord d'une manière pragmatique dans la maçonnerie romaine, puis de manière plus scientifique à partir du 19^e siècle.

Aujourd'hui, il est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction, sur tous les continents et sous toutes latitudes. Ceci peut-être confirmé par la phrase d'un spécialiste américain J.KELLY qui a écrit en 1961 que :

« Personne ne pensera utiliser du bois pour la construction d'un barrage, de l'acier dans des routes ou du bitume dans des bâtiments, mais le béton peut-être utiliser dans ces cas et plus encore... ».

Mais le béton non armé reste toujours un matériau fragile sous l'effet des efforts excessifs, la rupture se produit plutôt brutalement, sans avertissement, par fissuration– réalable et sans déformation importante.

Pour éviter ce phénomène de rupture et pour pallier sa faible résistance en traction et contenir une macro-fissuration stable dans les zones tendues, le béton doit être renforcé dans la plupart des cas par des armatures.

Ce renforcement est une étape importante qui a été parvenu dans l'histoire de ce matériau et qui a contribué au développement des applications structurales, en assurant une bonne sécurité.

Donc, l'introduction des barres d'acier a pour but de contrôler la macrofissuration.

Plus tard et afin d'empêcher toute création de fissuration le monde de la construction a conçu le béton précontraint.

Et parallèle, il y a une trentaine d'années environ, c'est développé des applications industrielles où un renforcement discontinu a été réalisé à l'aide de fibres incorporées dans le béton. Ceci est connu dans le milieu des chercheurs et les constructeurs par le béton de fibre.

PROBLEMATIQUE

Le concept, qui est le renforcement du béton par des fibres discontinues dans le volume, est un dérivé du concept de l'utilisation de fibres afin d'améliorer le comportement mécanique des matériaux fragiles pour une pérennité de la stabilité de l'ouvrage. Ce dérivé, appelé dans le domaine des matériaux de construction béton de fibre, a connu depuis les dernières décennies dans les pays industriels, des intérêts grandissant qui ont dépassé largement le stade de la simple curiosité technique et fait l'objet d'étude s'orientant de plus en plus vers l'analyse et la modélisation de cette association élémentaire afin d'arriver au stade d'une utilisation standardisée, simplifiée et sécuritaire.

Dans le cadre de cette recherche on doit étudier d'une part le comportement rhéologique les caractéristiques physico-mécaniques et éventuellement chimiques de la pâte de ciment du mortier et béton avec différents ajouts (laitier et filler), d'autre part et afin d'assurer la durabilité et la pérennité des ouvrages sous l'effet des différentes sollicitations, on doit améliorer les performances mécaniques du mortier et du béton avec l'incorporation des différentes fibres (propylène et acier).

Le Premier Chapitre: Ce chapitre est consacré à la recherche bibliographique, qui recensera le maximum de connaissances pour établir un aperçu historique du béton de fibre ainsi que les notions fondamentales de ce matériau, les caractéristiques géométriques et mécaniques des principales fibres susceptibles d'être employées comme matériau de renfort dans des matrices cimentaires.

Le Deuxième Chapitre: Concerne les différents facteurs qui influent sur le comportement rhéologique et mécanique du béton de fibre. Cette partie présentera d'une façon générale l'intérêt du béton de fibre, plus précisément, et son agissement sur le matériau ou la structure ainsi que les applications potentielles de ce béton.

Le Troisième Chapitre: Concerne un aperçu sur les caractéristiques physiques, chimiques, et minéralogiques des matériaux utilisés (ciment, filler, laitier, sable, gravier, fibres).

Le Quatrième Chapitre: Concerne l'étude expérimentale des propriétés physiques et mécaniques de la pâte du ciment, mortier et béton avec l'addition du filler, laitier et fibres.

Nous finalisons notre travail par des conclusions et des recommandations.

OBJECTIFS VISES

L'objectif de notre travail est de contrôler les différents comportements du mortier et béton du point de vue rhéologique, résistance mécanique, agressivité chimique et durabilité en introduisant de différents fibres et ce pour atteindre les performances mécaniques désirées.

CHAPITRE 1: NOTIONS SUR LES BETONS DE FIBRES

1.1. DEFINITIONS

1.1.1. Béton

Nous nous sommes habitués à définir le béton comme étant un mélange d'une pâte liante (Ciment+eau+adjuvants+ajouts éventuel) d'une part, et d'un squelette granulaire (Granulats+Sable) d'autre part, ce qui fait du béton un matériau hétérogène. Cette hétérogénéité est d'ordre : mécanique (dureté des granulats différente de celle de la pâte), chimique (retrait chimique empêché par le squelette granulaire) et thermique (dilatation thermique des granulats différente de celle de la pâte).

1.1.2. Constituants et formulation du béton

- **Les constituants**

Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau. Il est formulé en fonction de l'usage auquel il est destiné. Dans ce mélange, le ciment joue le rôle de liant du béton hydraulique. Il est lui-même composé de clinker, associé à des constituants secondaires (ajouts cimentaires ...). Suivant la proportion de ces éléments, on distingue différents types de ciment: ciment Portland, ciment Portland composé

- **Le ciment Portland:** est utilisé dans la préparation des bétons armés, le ciment Portland composé étant quant à lui destiné aux travaux de dallage et aux routes. Les autres types de ciment sont réservés aux travaux ne nécessitant pas une résistance particulière à la chaleur. Ils sont tout indiqués pour les travaux souterrains, les ouvrages massifs en eaux agressives.

Autres composants essentiels du béton, **les granulats** se caractérisent par les propriétés intrinsèques de la roche dont ils sont issus: coloration, caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, vont influencer directement les propriétés esthétiques, mécaniques et de durabilité du béton.

Les granulats sont également traités mécaniquement pour obtenir une forme particulière, une granulométrie et une propriété données. Ces traitements influencent très fortement des propriétés comme la demande en eau, l'ouvrabilité et la résistance mécanique du béton.

1.1.3. Fibres

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

1.1.4. Béton de fibres

On appelle béton de fibres, le mélange homogène d'une matrice minérale (mortier ou béton) et d'éléments de renfort discontinu présenté ici sous forme de fibres. L'incorporation de ces renforts se fait par l'inclusion directe de fibres isolées au moment de gâchage (béton de fibres) ou de la projection (cas de béton de fibres projeté). Il peut aussi contenir de la pouzzolane ou autres adjuvants généralement utilisés avec le béton ordinaire.

Nous pouvons constater aussi dans le rapport sur l'état de l'art de béton de fibres publié par le comité 544 de American Concrete Institutes en 1973 [ACI COMMITTEE, 1973], la définition suivante "Le béton de fibres est un béton constitué d'un ciment hydraulique et un granulats fin ou gros et des fibres discontinues". Cela veut dire que le béton de fibres est un béton conventionnel auquel on a ajouté des longueurs discontinues de fibres durant la préparation du mélange.

1.2. APERÇU HISTORIQUE SUR BETON DE FIBRES

Historiquement, il n'y a pas une confirmation quand est-ce le concept du renforcement du béton des fibres a été connu en premier lieu.

D'après Exode 5:6 les Egyptiens ont utilisé les pailles pour renforcer la brique de boue. Il y a aussi une certitude que les fibres d'amiante ont été utilisées dans le renforcement des poteries en argile en Finlande, il y a de cela 5000 ans [MEHTA, P.K, 1986]. Dans d'autres

sources [ANTOINE, E.N,1985, ACI COMMITTEE,1984], Il a été indiqué que les pailles ont été utilisées pour renforcer les briques chez les anciens, tandis que les poils des animaux et les fibres d'amiante ont été introduites pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment Portland. On peut noter aussi la réalisation au milieu duXVeme es eme siècle d'alliages métalliques avec fibres de carbone.

Cette réalité a été confirmée par M.BRAUN avec d'autres chercheurs [BRAUN,M.;1980] qui ont rapporté que la première matière renforcée par des fibres a été fabriquée par l'homme en introduisant les pailles et d'autres produits semblables dans des matériaux de construction telle que le mortier, le plâtre ...etc. Mais le professeur ALBERTO FAVA de l'université de PLATA de l'Argentine a écrit que l'horneros, qui est un petit oiseau vivant en argentine, au Chili et en Bolivie, avait construit avec soin son nid en utilisant bien l'argile renforcée par des pailles depuis des siècles bien avant l'homme [BRAUN,M.1980]A la fin du 19^{ème} siècle, les matériaux artificiels fibreux ont commencé à devenir populaire Plusieurs domaines sont arrivés à exploiter ce nouveau matériau.

En Algérie, comme dans tous les pays maghrébins, on trouve chez les anciens le pisé qui était de l'argile armée de paille hachée mise en place par compression pour produire ce qu'on appelle-le "Toub" . C'est une brique de terre stabilisée ou non, moulée manuellement et séchée à l'air libre. Ce type de matériaux est utilisé notamment au centre et au sud de l'Algérie en tant que matériau de maçonnerie et joint de murs. Mais le développement de ce type de matériaux peut-être attribué à JOSEPH LAMBOT [ANTOINE, E.N;1985].

Son brevet qui a été établi en 1847, a suggéré l'ajout de fils continus ou de treillis métalliques pour créer un nouveau matériau qui peut-être, à son avis, une solution face aux problèmes de fissurabilité des bétons. Ces développements sont à l'origine de la technologie actuelle du béton armé. Ce concept conduit toutefois à un matériau anisotrope dans lequel les armatures continues, qui nécessitant, à la construction, un travail manuel important, ne travaillent que dans une direction privilégiée, et sont relativement inefficaces face aux fissures micro-structurales.

Vingt sept ans après, l'américain A.BERNARD [ANTOINE, E.N;1985] est parvenu en Californie (U.S.A), à créer une pierre artificielle par l'ajout de granulats en fer recuit dans un

mélange de béton. Ensuite, et en 1899 un processus de fabrication d'éléments composites à base de ciment et d'amiante a été mis au point par LHATSHELS.

En 1910 une série d'essai pour améliorer la résistance du béton a été fait par J.PORTER [PORTER, H.F ; 1910] qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction. Il est arrivé à cette conclusion: " Indeed it is not at all improbable that, in the not very distance future, reinforcement of this nature, that is supplying resistance to particles throughout the mass, by introducing here and there short pieces of steel, on the tensile side especially, will come into use, thus making concrete a more truly homogenous structural material".

Par la suite GRAHAM [GRAHAM, G.M.; 1911] a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction.

Une année après, en 1912 WEAKLY [WEAKLEY, B.D.;1912] déposa un brevet aux U.S.A qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1914 le premier brevet britannique a été établi par FICKLEY [FICKLEY,W;1914] qui a décrit différentes pièces métalliques tortueuses. Il a confirmé que la résistance à la fissuration et à la fatigue a été améliorée, mais il a noté aussi qu'il n'y avait pas une amélioration dans la résistance du composite ni à la traction ni à la compression.

A l'opposé de FICKLEY, H.ALFSEN a rapporté dans ses travaux [ANTOINE, E.N;1984] que la résistance à la traction d'un béton renforcé par de petits éléments longitudinaux en fer (fibres), en bois ou en tout autre matériau a été améliorée. Il a suggéré également l'amélioration de l'état de surface des renforts. En effet, d'après ALFSEN, les renforts doivent être rugueux et arrondis aux extrémités afin de leur procurer une bonne adhérence à la matrice en béton.

En 1920, A.KLEINLOGEL [ANTOINE, E.N,1984] a déposé le premier brevet allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier. A cette période là, une étude sur les bétons renforcés avec des fibres de verre a été publiée par GRIFITH [5]. Sept années après, en 1927 deux brevets sur les bétons renforcés par

des fibres ont été établis par W.SMITH [SMITH, W,1927] et G.MARTIN [MARTIN, G.C;1927] en Californie. Le procédé MARTIN recommande l'ajout des plaquettes d'acier embouties ou de fils d'acier dans le béton qui sert à la fabrication des tuyaux, alors que W.SMITH recommande le malaxage des morceaux de fil tordus avec le béton en vue de construire un immeuble en béton armé.

Quelques années après, en 1933 en New Jersey, H.ETHRIDGE a inventé une technique pour améliorer la forme des fibres afin d'augmenter leur contribution. Il a recommandé ensuite d'ajouter au béton des fibres en forme d'anneaux de différentes dimensions et de différent diamètre pour améliorer la résistance à la fissuration et à la fatigue du béton utilisé dans la construction des voies ferrées.

En 1938, un autre brevet a été établi par ZITEVIC [ZITKEVIC,N,1983] en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer avec approximativement 100mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très similaires aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres dans le béton pour améliorer sa performance.

Mais on note ici que celui de CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, méritent une attention particulière. Les paramètres de renforcement qu'il a recommandés à l'époque sont similaires à ceux d'aujourd'hui pour le béton de fibres.

Il a recommandé également l'emploi de fibres permettant l'amélioration de la résistance à la fissuration et à l'absorption de l'énergie par la masse de béton. Il a suggéré l'utilisation de ce nouveau composite dans plusieurs domaines spécialement la construction.

Des pistes aéroportuaires, fondation de machine et tous les ouvrages similaires.

Cette période représente la première époque de développement des bétons de fibres, caractérisée par l'incertitude et des spéculations sur les performances réelles de ce composite.

Au début des années soixante, une série de brevets a été établie par [BATTELLE DEVELOPMENT CORPORATION 1963]. Ces brevets sont basés sur l'utilisation des

morceaux d'acier courts pour renforcer le béton. Les moyens expérimentaux à cette période ne permettant d'envisager que de simples essais de compression ou flexion à charge contrôlée.

Une amélioration dans la résistance à la traction, à l'absorption de l'énergie et à la résistance à l'usure a été rapportée dans ces brevets.

En 1963, deux articles ont été publiés par ROMUALDI et BATSON [ROMUALDI, J.P. & BATSON, G.B, 1963]. Le premier sous le titre "The mechanics of crack arrest in concrete", le deuxième s'intitule "Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforced".

Dans ces deux articles, une analyse théorique des résultats donnés par les brevets de Battelle Development Corporation a été fondée avec des données expérimentales obtenues à partir de l'essai de flexion.

Par la suite, les recherches sur les bétons de fibres ont connu un réel développement grâce aux travaux de ROMUALDI, BATSON et MANDEL et d'autres [ROMUALDI, J.P. & MANDEL, J.A.; 1964]. Dans ces travaux, qu'on peut qualifier comme des essais pilotés en déformation, les chercheurs sont arrivés à mettre en évidence les propriétés nouvelles de ce composite. Ils ont décrit les mécanismes de propagation et d'arrêt d'une fissure au sein d'une matrice fragile. Ils ont aussi développé une analyse théorique aux résultats donnés par les brevets de Battelle Development Corporation en mettant notamment l'accent sur l'influence de l'espacement moyen des fibres sur le comportement du composite.

La fin des années soixante a connu la participation d'un grand nombre de chercheurs afin d'orienter les axes de recherches vers l'application, avec toute la fiabilité, du béton de fibres dans les domaines de construction. Les travaux se multiplient et une multitude de types de fibres a été introduite dans le commerce comme étant de nouvelles applications. Le plus grand progrès dans ce domaine a commencé dans les années soixante dix avec l'incorporation des fibres d'acier dans l'industrie réfractaire.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Mais, aujourd'hui, avec le développement des moyens expérimentaux, l'utilisation de ce type de matériaux s'est orientée vers les structures

présentant des phénomènes de fissuration avec des bétons traditionnels. Le premier article dans ce concept peut-être attribué à [LANKARD et SHEETS 1971].

Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance, sa ténacité et sa durabilité.

Dans notre article présenté à la sixième conférence internationale des matériaux composites [BEDDAR, M.et al;1986], l'utilisation des fibres dans un béton réfractaire exposé à une température de 1600 °C montre que la ténacité et la résistance à la flexion augmentent d'une façon significative.

1.3. CARACTERISTIQUES, CHOIX ET ROLE DES FIBRES

Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour telle application, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

Elles peuvent être classées par famille:

1.3.1. Principales fibres utilisées

a) Fibres minérales: Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine,...etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles.

Les fibres d'amiantes autrefois utilisées pour l'isolation et l'ignifugeant, se sont aujourd'hui révélées cancérogènes.

b) Fibres végétales: La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis.

Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, les fibres vasculaires et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction

c) Fibres synthétiques: Cette famille regroupe plusieurs types de fibres comme (nylon, polypropylène, acryle, polyster ...etc.). Elles sont apparues à la fin du XIX^e siècle sous le nom de rayonne. Elles sont dérivées de la cellulose naturelle. Aujourd'hui, la plupart des fibres synthétiques proviennent de produits dérivés du pétrole et de polymères géantes dont la structure ressemble à celle des matières plastiques..

d) Fibres artificielles: Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction. Ci-après nous allons présenter les principales fibres utilisées pour renforcer les mortiers et bétons.

1.3.1.1. Fibres d'amiante

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait des bâchettes de micro-fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu [26], une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux micro-organismes, ainsi que leur résistance électrique élevée.

Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur.

1.3.1.2. Fibres de cellulose

Les fibres de celluloses sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et Mécaniques, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices organiques et aussi des matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces, des pipes, et d'autres types d'éléments. Leurs propriétés physiques sont changeables selon les modes de fabrication de ce type de fibres. Les diamètres de ces fibres varient de 1 à 4 mm, tandis que leurs longueurs comprises entre 10 à 50 mm.

1.3.1.3. Fibres de polypropylènes

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés. Il est fabriqué depuis 1954 pour l'industrie textile. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa, déformabilité élevée et imputrescibilité.

Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées.

L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960 mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande Bretagne.

Elles sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel) et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux [33].

Il est constaté que le polypropylène est sensible aux ultra-violets. Son exposition prolongée au rayonnement solaire provoque une oxydation mais, noyé dans la matrice, les fibres de Polypropylène sont protégées de l'oxydation.

Les caractéristiques principales de ces fibres sont illustrées dans le tableau 1-1

Tableau 1-1. Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique Kg/dm ³	Résistance En traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Elongation à la rupture (%)	Volume typique à la composite (%)
Polypropylène (fibrillated)	0.5 à 4	5 à 75	0.9	400 à 800	4000 à 8000	8	0.2 à 1.2

L'ajout des fibres de polypropylène varie de 0.2 à 0.7 en volume de béton, soit 0.08 à 0.27 % en poids du béton, c'est à dire 0.9 à 6.3 kg / m³. Les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé par ces fibres sont dues à la présence des fibres de polypropylène qui sont très élastiques et à celle de l'air occlus.

1.3.1.4. Fibres de verre

Ces fibres sont alors fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les fibres de verre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...)
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion
- Conductivité thermique relativement faible

1.3.1.5. Fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil.

En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaçage entre fibre et matrice.

Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fig.1.1. Différentes formes des fibres d'acier.

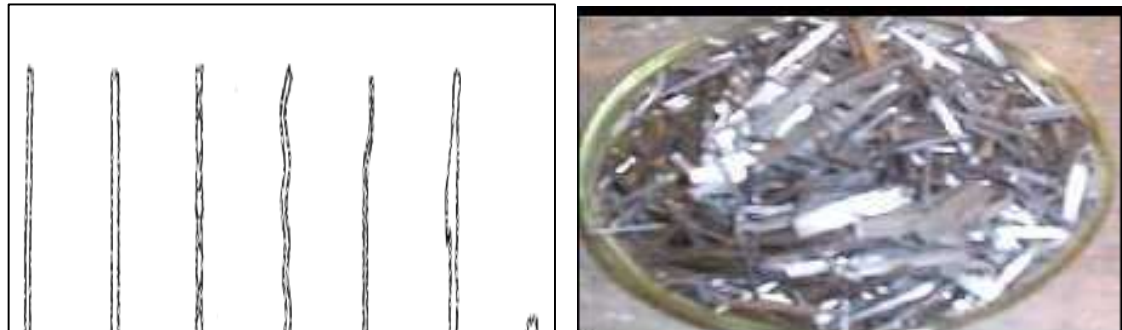


Fig. 1-1 a- Différentes formes des fibres d'acier

b- Type de fibres métalliques dramix

Fibre ce qui les conduit aux nombreuses variétés de fibres qui se différencient les unes des autres par leur diamètre, leur section (ronde, carrée, rectangulaire), leur longueur et leurs modes d'opérations. La figure.1.1 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton.

Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1-2. Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier

Fibres	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique Kg/dm ³	Résistance En traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Coeff de dilatation Micro/m	Résistance Au fau (°)
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.8	1000 à 3000	200000	11	1500μ

1.3.2. Critères de choix des fibres

Le choix d'une fibre doit être basé sur le fait que la fibre utilisée doit être, avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la

matrice, et en particulier avec le ciment. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût bien acceptable, compte tenu des performances qu'elle confère à la matrice.

Le choix dépend aussi de l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation de structure, projection, renforcement d'une pâte pure...etc.) et des propriétés mécaniques de la fibre (résistance, module d'élasticité, adhérence avec la matrice... etc.).

Tableau 1-3. Caractéristiques mécaniques des principales fibres utilisées pour renforcement du mortier et du béton

Nature des Fibres	Diamètre (µ m)	Masse Volumique Kg/dm ³	Résistance à la traction Mpa	Module D'élasticité Mpa	Allongement A la rupture %
Amiante	à20	2.55	3000 à 4500	165000	2 à3
Verre.....	9 à15	2.6	2000 à 4000	70000à 80000	2 à3.5
Graphite...	8à 9	1.9	1500 à 3000	240000à 415000	0.5 à 1
Acier.....	5à500	7.81	1000 à 3000	200000	3 à 4
Polypropylène	20à200	0.91	500 à 750	5000 à7000	20
Aramide...	10	1.45	3600	65000 à133000	2.1

D'après le Tableau.1.3 présenté ci-dessus, on peut conclure que si l ; on veut améliorer la résistance à la traction de la matrice, les fibres utilisables sont ceux qui présentent une résistance importante à la traction, un module d'élasticité élevé, un allongement à la rupture satisfaisant et une adhérence convenable avec la matrice.

Ces fibres sont généralement d'origine minérale (amiante) ou artificielles (acier, verre, carbone).

On peut dire que le choix des fibres doit être axé vers des qualités indispensables pour être mises avec fiabilité à la performance d'un composite. Elles doivent avoir une bonne adhérence et une compatibilité avec la pâte de ciment, et avoir une bonne résistance à la traction. Elles doivent aussi ne pas être attaquées par le milieu basique du ciment et conservent dans le temps leurs qualités propres et en même temps ne présenter aucun danger pour la main d'oeuvre qui les utilise et enfin être d'un prix abordable compte tenu des dosages à utiliser.

1.3.3. Rôles des fibres dans le béton

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Si le but est uniquement une résistance très élevée

du béton, alors que l'industrie actuelle des matériaux de construction offre d'autres produits ou procédés plus économiques et plus efficaces que les fibres.

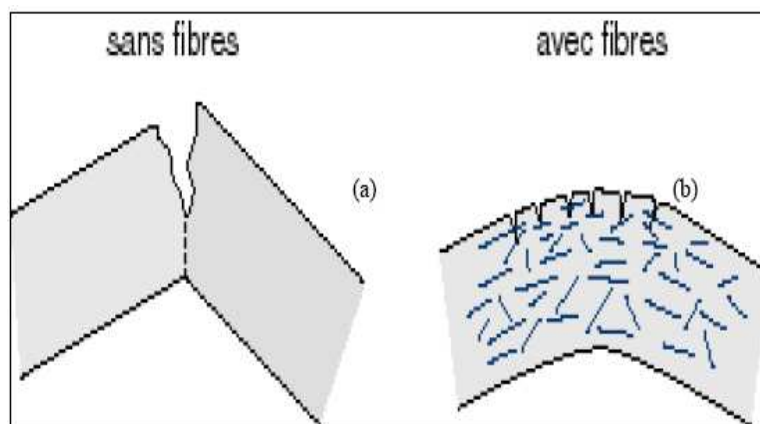


Fig. 1-2. La fissuration dans le béton non armé de fibres (a) et béton armé de fibres (b)

Ceci nous laisse constater que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels :

Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.

Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

En effet, il est maintenant bien connu que toute matrice cimentaire présente des zones internes de faiblesse. Ces zones sont caractérisées soit par des microfissures qui sont dues à différentes causes (retrait, contraintes thermiques, contraintes appliquées à jeune âge...etc.) ; soit par une forte porosité.

Dans le cas d'un béton fissuré, lors d'une traction sur ce matériau, les lignes de tension doivent s'infléchir, parce que la charge ne peut pas être transmise par la fissure, alors que les tensions aux extrémités de la fissure augmentent, ce qui laisse celles-ci se propager sans empêchement et donne lieu à une rupture fragile. Dans le cas d'un béton renforcé de fibres d'acier, une partie de la force de traction peut être transmise à travers cette fissure par les fibres qui assurent la couture des microfissures. Ces microfissures ne peuvent s'agrandir que lorsque la fibre qui forme un pont entre les deux lèvres de la fissure permet par un écoulement plastique de la fibre l'ouverture de celle-ci [figure.1-2].

En général, le rôle d'une fibre apparaît clairement dans le cas de la ruine d'un composite due à la propagation d'une fissure. Ces zones sont caractérisées soit par des microfissures qui sont dues à différentes causes (retrait, contraintes thermiques, contraintes appliquées à jeune âge...etc.) ; soit par une forte porosité.

Dans le cas d'un béton fissuré, lors d'une traction sur ce matériau, les lignes de tension doivent s'infléchir, parce que la charge ne peut pas être transmise par la fissure, alors que les tensions aux extrémités de la fissure augmentent, ce qui laisse celles-ci se propager sans empêchement et donne lieu à une rupture fragile [Figure.1.3]. Dans le cas d'un béton renforcé de fibres d'acier, une partie de la force de traction peut être transmise à travers cette fissure par les fibres qui assurent la couture des microfissures. Ces microfissures ne peuvent s'agrandir que lorsque la fibre qui forme un pont entre les deux lèvres de la fissure permet en général, le rôle d'une fibre apparaît clairement dans le cas de la ruine d'un composite due à la propagation d'une fissure [figure1.3].

L'utilisation du microscope à balayage sur des échantillons d'un composite à fibres courtes nous a permis de rapporter que l'augmentation de contrainte à l'avant d'une fissure en croissance entraîne la surcharge et la rupture des fibres de renforcement (a), tire les fibres hors de la matrice (b) ou sépare la matrice des fibres (c). Lorsque la fissure se propage entre les fibres, elle force progressivement la matrice à se déformer et à céder (d).

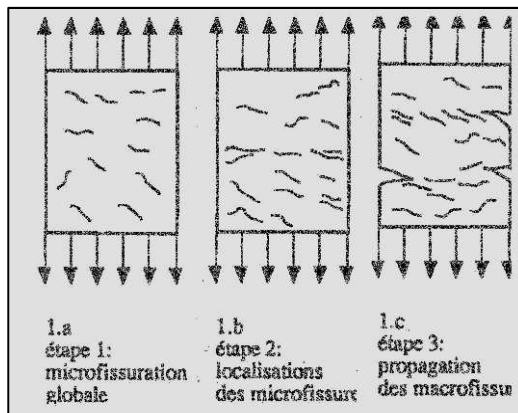


Fig. 1-3. La propagation de la micro- Fissures dans un béton sollicité à la traction

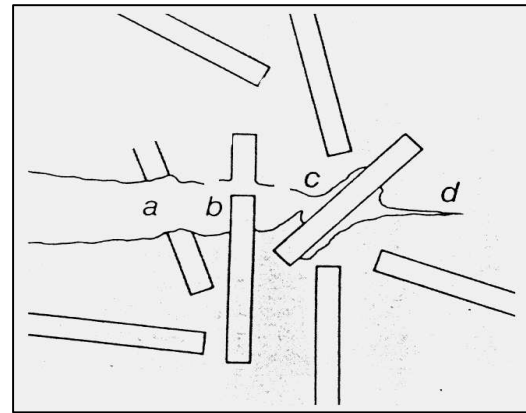


Fig. 1-4. La ruine d'un composite

Alors, plus les fibres sont nombreuses, et mieux elles sont ancrées dans le béton, plus grande sera leur efficacité. Un bon ancrage peut s'obtenir avec des fibres aussi longues que possibles ou ayant une adhérence améliorée. Le nombre des fibres par unité de poids augmente en réduisant leur diamètre. L'efficacité des fibres croît avec le rapport (longueur / diamètre) et avec une meilleure adhérence entre la fibre et le béton.

En résumé, il est nécessaire de dire que les fibres assurent le rôle principal de modifier la répartition des fissures, de les couvrir, par conséquent de rendre le matériau moins fragile et donc plus ductile.

1.4. FABRICATION DES FIBRES : CAS DES FIBRES D'ACIER

La fabrication des fibres d'acier a connu un grand développement durant les dernières années.

Mais à l'origine, ces fibres rectilignes et de section circulaire ont évolué vers des fibres d'acier en tôle cisailée.

La première méthode, qui a été brevetée en 1974 par Batelle corporation de l'Ohio [16], consiste à extraire des fibres d'un bain liquide d'acier. Une roue formée d'une série de disques parallèles en cuivre comportant des encoches est plongée sur une faible hauteur dans un bain

d'acier en fusion comme il est illustré à la figure.1.4. Par rotation, elle envoie dans l'air sous l'action de la force centrifuge Fig I.4. La ruine d'un composite Fig.I.3 La propagation de la fissure aux micro-fissures dans un béton sollicité à la traction Fig1.5. Procédé de production de fibres métalliques par extraction d'un bain liquide.

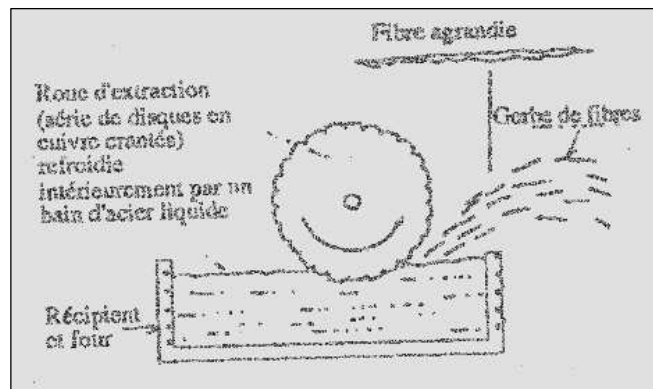


Fig. 1-5. Procédé de production de fibres métalliques par extraction d'un bain liquide

Des morceaux de métal en fusion qui se refroidissent et donnent des fibres courtes. Les encoches du disque, sa vitesse de rotation, et la profondeur d'immersion de disque, soit trois facteurs qui limitent les caractéristiques géométriques des fibres.

Par cette méthode, on arrive à avoir des fibres avec des surfaces irrégulières, ce qui facilite l'adhérence à la pâte de ciment. Leur diamètre peut descendre jusqu'à 0.5 mm et leur longueur peut atteindre 50mm. Ce système industriel permet de fabriquer des fibres avec une teneur en carbone plus élevée, des fibres en acier inoxydables, des fibres riches en nickel et chrome (fibre réfractaire) et des fibres en ferrochrome.

Une autre méthode [BATTELLE DEVELOPMENT CORPORATION; 1963] consiste à faire passer de l'acier au travers une filière pour obtenir des fibres d'acier. Les fils continus peuvent être découpés et munis de crochets. Les fibres sont encollées en bûchettes ou paquets de 10 à 20 fibres élémentaires. Ces paquets de fibre présentent l'avantage de ne pas former d'oursin et peuvent être directement introduits dans le malaxeur, en même temps que les agrégats secs.

Sous l'effet des contraintes de malaxage, les plaquettes se cassent en deux, puis en deux et ainsi de suite. Lorsque les paquets ne comportent plus que 2 à 4 fibres, les contraintes

d'encollage des fibres sont alors supérieures aux contraintes de malaxage. L'arrivée de l'eau ou l'effet de l'humidité naturelle des agrégats dissout la colle, libérant définitivement les fibres qui prennent leur élanement unitaire.

La présence des crochets aux extrémités augmente la résistance à l'extraction de la fibre d'où une meilleure mobilisation des fibres après fissuration. Leurs diamètres s'échelonnent de 0.4 à 0.8 mm et leur longueur de 25 à 60 mm.

La recherche permanente de performances techniques, alliée aux besoins économiques, a motivé l'utilisation de matériaux de toute nature puis le développement de fibres spécifiques.

En effet, des études en Belgique ont montré que certaines fibres présentant des crochets avaient une très grande adhérence et permettaient d'accroître les résistances. D'autres fibres métalliques spéciales, fabriquées et commercialisées sous le nom de Beki-shield, présentent des propriétés intéressantes. Elles sont très minces et moins abrasives, moins irritantes au toucher que les fibres de verre, et sont aussi fabriquées à partir d'un acier inoxydable [BEKAERT,1986]. En France aussi, une méthode de fabrication des fibres a été brevetée par le Groupe Saint- Gobain. Ces fibres qui sont commercialisées sous le nom FIBRAFLEX sont obtenues par trempe d'un jet de métal liquide sur une roue en rotation à grande vitesse et refroidie à l'eau.

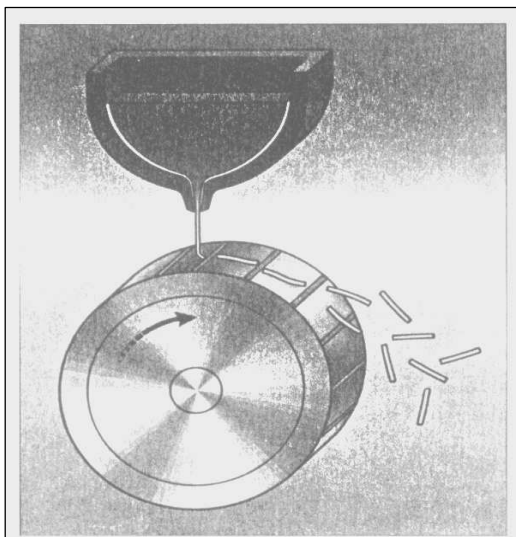


Fig. 1-6. Méthode de la trempe d'un jet de métal sur une roue en rotation

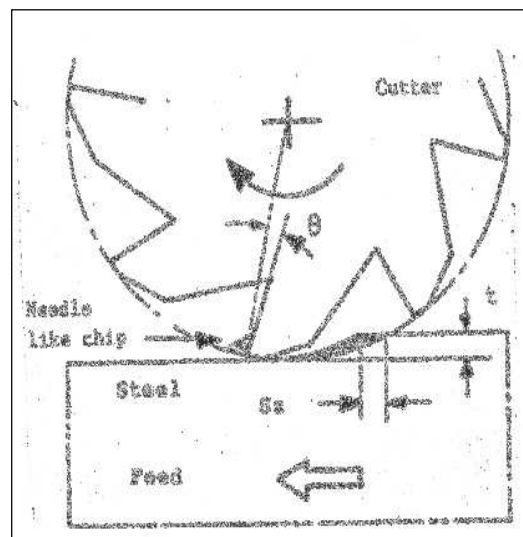


Fig. 1-7. Schéma de la méthode fraissage

En général, la fabrication des fibres d'acier devient aujourd'hui une industrie de la technologie avancée. Quelques méthodes de fabrication des fibres sont rapportées ainsi que quelques caractéristiques de ces fibres.

1.5. APPLICATIONS DU BETON RENFORCE DE FIBRES

On peut distinguer deux modes d'utilisation des fibres :

1) Le béton renforcé de fibres seules : Dans ce cas les propriétés des bétons de fibres seront liées à plusieurs paramètres. Ces paramètres sont généralement le type et les propriétés de matrice utilisée, type et propriétés des fibres utilisées, ainsi que la méthode de mise en oeuvre.

2) Le béton renforcé avec des armatures traditionnelles : Dans ce cas on introduit les fibres dans les éléments structuraux en béton armé soumis à des sollicitations combinées afin de majorer la résistance et la rigidité des éléments concernés.

Dans le tableau ci dessous on indique quelques sites ou le béton de fibre a été utilisé.

APPLICATIONS	INTERET APORTE PAR L'ADJONCTION DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisation et coques minces faiblement sollicitées	<ul style="list-style-type: none"> -Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge -Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallage, chaussé en béton, dallages manufacturés, et tous éléments structuraux soumis à la flexion.	<ul style="list-style-type: none"> -Diminution de 40% de l'ouverture des fissures -L' augmentation de la rigidité après la fissuration -Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation la résistance a l'usure
éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...).	<ul style="list-style-type: none"> -Amélioration de la charge ultime -Pas de la rupture catastrophique
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles eg : piste d'un aéroport.	<ul style="list-style-type: none"> -L'énergie absorbée est plus importante -La durée de choc est augmente -Loi de comportement du matériau et fortement modifies
Structures soumises à des sollicitations combinées	<ul style="list-style-type: none"> -Les majorations de résistance et de rigidité obtenues sous sollicitations simples ne se trouvent pas forcément dans le cas du comportement sous sollicitations combinées
Réparation des revêtements : routiers, tablier du pont.	<ul style="list-style-type: none"> -Amélioration de la résistance aux chocs -Amélioration de la déformabilité
Parties exposées aux fortes variations température aux mêmes très hautes températures	<ul style="list-style-type: none"> -Remplacements avec succès du revêtement réfractaire -Diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisations des parois rocheuses les talus, les tunnels, les galeries souterraines	<ul style="list-style-type: none"> -Evite le travail de fexation du grillage ordinairement employé -Diminution le coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus,
Fabrication des pieux, revêtements ignifuges isolants (constructions navale)	<ul style="list-style-type: none"> -Augmentation la résistance au feu -Augmentation la résistance a l'usure -Augmentation la durabilité du revêtement

CHAPITRE 2: LA RHEOLOGIE ET LES PROPRIETES MECANIQUES DU BETON DE FIBRE

2.1. LA RHEOLOGIE DU BETON DE FIBRE

2.1.1. Introduction

La rhéologie, est la science de la physique qui étudie l'écoulement de la matière condensée, en fonction des sollicitations qu'elle subit et du temps.

Pris dans son acceptation la plus large, cette science n'impose aucune restriction particulière quant à l'ampleur des mouvements relatifs des particules constituant les corps étudiés, ou quant aux sollicitations agissantes.

L'étude Rhéologique du béton renforcé de fibres comme pour les bétons frais sans fibres étant très complexe, peu de chercheurs à ce jour l'ont abordée de front, en terme susceptible d'aboutir à une définition de l'équation Rhéologique du béton soit renforcé par fibres ou non.

Pourtant depuis que le béton existe, soit avec ou sans fibres, les chercheurs et les techniciens ont senti la nécessité de maîtriser les lois de son écoulement à l'état frais, pour qu'il emplisse au mieux les coffrages, dans un souci de compacité maximum. Par des voies détournées et des concepts souvent subjectifs, ils ont abouti à des règles pratiques leur permettant d'atteindre plus au moins parfaitement cet objectif.

En plus, les propriétés des composites sont fonction des propriétés élémentaires de chaque constituant et ses formulations ainsi que leur mise en œuvre.

Il est maintenant bien confirmé que l'addition de fibres à un béton ordinaire pose très vite des problèmes d'élaboration, dus à la réduction de la maniabilité. L'expérience montre, d'après tous les essais faits par les chercheurs [EDINGTON, J1973., CUSENS, A.R1956, DEBICKI, G1990, SWAMY,R.N1983], que ce n'est pas uniquement la géométrie des fibres et le volume incorporé qu'influencent les propriétés rhéologiques de béton frais renforcé de fibres, mais aussi la taille, la fraction volumique des gros granulats.

En général l'ajout d'une certaine quantité de fibres à la matrice de béton n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants de celui-ci. Toutefois, la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition, en ayant toujours présent à l'esprit les deux problèmes principaux :

- Possibilité de formation de pelotes de fibres « oursins », due à une mauvaise distribution des fibres. Cette mauvaise distribution peut résulter soit de la nature et du volume de fibres utilisées, soit de l'enchevêtrement des fibres lors de leurs déversements dans le malaxeur.

- Une diminution de la maniabilité du matériau avec l'ajout des fibres. Si l'on ne veut pas compenser cette baisse par une augmentation de la quantité d'eau et perdre les bénéfices du fibrage, il faut agir soit en ajoutant des fluidifiants, soit en recourant à une vibration efficace.

Les facteurs qui influencent la maîtrise de ces deux problèmes sont nombreux et les importants sont : la longueur et le dosage en fibres, la taille et la rugosité des granulats et la formulation granulométrique.

2.1.2. Facteurs influents sur l'ouvrabilité de béton de fibres

D'une manière générale, l'ajout des fibres dans un béton hydraulique est décidé lorsqu'on cherche à améliorer certaines qualités comme on a déjà dit :

- D'une part au niveau de parement moindre fissuration au retrait ou meilleure ténacité, plus grande dureté ou résistance à l'usure,... etc.

- Et d'autre part en masse : meilleure ductilité de la structure fibrée, résistance au choc, résistance aux différentes sollicitations,...etc.

Mais le gain sur ces caractéristiques s'accompagne de modifications du comportement du béton, tout particulièrement lors de la mise en œuvre. Ces modifications se traduisent par l'apparition de deux problèmes : formation d'oursin et la diminution de l'ouvrabilité.

Dans ce contexte, on va essayer d'étudier les facteurs primordiaux qui influencent la maîtrise de la modification dans la rhéologie de béton lors de l'ajout des fibres. Ces facteurs,

qui sont déjà mentionnés, jouent un rôle important dans la mise en œuvre de béton et ensuite dans la détermination des propriétés mécaniques finales.

2.1.2.1. La longueur et le dosage en fibres

Une collecte de fibres minces avec un rapport longueur/diamètre supérieur à 100, dans le malaxage à la fois peut constituer des oursins où nids d'oiseau difficile à éliminer par une simple vibration. Pour les fibres, ayant un rapport longueur / diamètre inférieur à 50, sont aisément dispersées par vibration.

En général, Pour la majeure partie des applications industrielles actuelles, la maniabilité de béton de fibres est un paramètre primordial. Des études expérimentales réalisées par plusieurs chercheurs [HUGHES, B.P1976, AVESTON, 1973], ont montré que le rapport l/d de fibres cylindriques joue un rôle central dans la maniabilité. Ils sont arrivés à une constatation empirique qui se résume ainsi : "Pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand plus la maniabilité du béton de fibres est mauvaise, et plus le risque formation de pelotes de fibres au sein de la matrice est grand ". Cette constatation peut-être expliquée en basant sur deux raisonnements :

1) Si on raisonne à longueur de fibre donnée et pour un même dosage, plus la fibre a un diamètre petit, plus la surface spécifique de la fibre est importante, et plus le nombre de fibres est grand. La surface spécifique plus grande conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, alors que le plus grand nombre de fibres conduit à une probabilité plus élevée de contacts entre fibres. Ces deux facteurs expliquent parfaitement la perte de maniabilité observée lorsque le rapport longueur/ diamètre de la fibre augmente.

2) Si on raisonne à rapport longueur / diamètre de fibre donné et pour un dosage donné, plus le diamètre de la fibre est petit, plus la fibre doit être courte et inversement. Dans ce cas, si on se réfère au raisonnement précédent, on aboutit à la conclusion que plus la fibre est courte, plus elle perturbe la matrice du point de vue rhéologique, et donc moins bonne est la maniabilité, ce qui constitue un résultat inverse de la réalité expérimentale, car il est connu que, pour des rapports longueur/diamètre voisins, une fibre courte conduit à une meilleure maniabilité qu'une fibre longue.

En conclusion, pour une longueur donnée de fibre, la maniabilité d'un béton renforcé de fibres diminue avec la diminution du diamètre de cette fibre, et que pour un rapport longueur / diamètre donné (au voisin), la maniabilité diminue lorsque la longueur de la fibre augmente.

Cette constatation est valable pour d'autres types de fibres (fibres de verre, fibres de carbone).

Des résultats obtenus par [BOUCHEKOUK et al 1987], en utilisant un béton renforcé de fibres de verre enrobées de thermoplastiques, confirment cette réalité. Ils ont constaté, après une série des essais, une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'augmentation de l'élanement de la fibre, ainsi qu'avec l'augmentation de la proportion volumique des fibres incorporées.

2.1.2.2. La taille et la rugosité des granulats

Le problème est plus compliqué quand les fibres sont introduites dans un béton au lieu d'un mortier. Dans un mortier, les fibres sont séparées par un matériau granuleux fin qui peut se déplacer facilement entre elles, mais dans le cas d'un béton, elles sont séparées par des particules qui seront d'une plus grande taille que l'espacement moyen de fibre si les fibres sont uniformément distribuées. Cela conduit à un regroupement des fibres avec une grande interaction entre les fibres et les agrégats grossiers et l'effet devient plus prononcé comme le volume et la taille maximale des particules augmentent.

Ce principe est démontré dans la figure 2.1, qui montre nettement qu'il est difficile de réaliser une dispersion uniforme de fibres une fois que la dimension d'agrégat augmente de 5 mm à 10 mm à 20 mm. Cependant, ceci est une image simplifiée parce que, en réalité, la dispersion des fibres et des agrégats est tridimensionnelle et il peut y avoir jusqu'à 200 fibres en n'importe quel cube donné de mortier de longueur latérale égal à la fibre avant que l'interaction devienne excessive. Néanmoins, il est clair de la figure 2.1 que plus le volume et la taille d'agrégat grossier sont grands plus que l'interaction des fibres se produira.

Dans un mélange de béton normal, les particules plus fines que 5mm occupent environ 54%, les agrégats de 10 mm occupent environ 20 % alors que celles de 20mm occupent environ 25 % de volume.

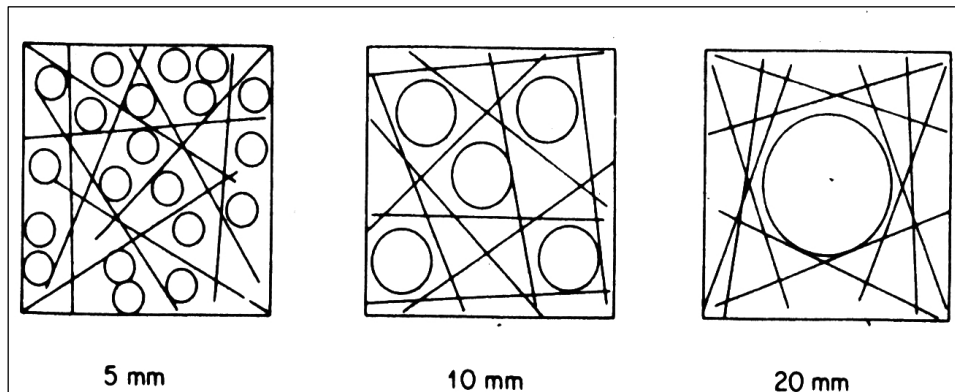


Fig. 2-1. Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre=40mm

Ainsi seulement 54 % de vrai volume (c-a-d, la fraction de mortier) sont disponibles pour le mouvement libre des fibres pendant la vibration. L'expérience a prouvé qu'un mélange satisfaisant pour le béton de fibre devrait contenir un volume de mortier d'environ 70 % avec uniquement d'environ 30% de volume consistant en particules entre 5 mm et 10 mm.

En général, une forte réduction de l'ouvrabilité se produit lorsqu'on augmente la teneur en grains de dimensions supérieures à 5 mm dans le mélange. C'est pourquoi la granulométrie des bétons ordinaires n'est pas utilisable dans les bétons armés de fibres : la proportion du sable doit être beaucoup plus grande et les bétons armés de fibres doivent être surdosés engrain au-dessous de 5mm. On y voit qu'avec l'augmentation de l'élancement, les fils entassés seuls (courbe a) suivent quant à la diminution du volume occupé, une loi homologue à celle que suivent les fils enrobés d'une matrice.

2.1.3. La formulation de béton de fibres

La formulation de béton de fibres n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants de celui-ci : on peut utiliser le même ciment, les mêmes granulats, et également les mêmes adjuvants ; par contre une optimisation de l'efficacité des fibres nécessite une étude minutieuse de la composition. Les résultats de ce type des études sont plutôt rares.

[L'USCOLD CONCRETE COMMITTEE1981] propose un faisceau granulométrique avec deux dimensions maximales de granulats (10 et 20 mm), pour l'élaboration des bétons renforcés de fibres. [DEHOUSSE et al 1974] dégagent la règle suivant laquelle la teneur en gravillon (G) ne doit pas dépasser la moitié de la quantité totale des granulats.

$$\frac{G}{G + S} < 0.5 \tag{2-1}$$

Avec G = Gravillon, S = Sable,

D'autre part [MOENS 1968], dans son travail concernant la formulation de béton de fibres, propose une limite au produit primordial ($V_f \cdot l/d$) qui caractérise bien l'effet de volume de fibres et l'élancement de la fibre. Il a pris en compte le dosage et la dimension du granulat.

La formule de MOENS est traduite par cette inégalité :

$$V_f \frac{l}{d} < C_m \tag{2-2}$$

Où V_f est le pourcentage en volume des fibres ;

l/d est la longueur relative et, C_m est un coefficient donné par la formule

$$C_m = \sum P_{gn} \cdot C_{gn} \tag{2-3}$$

P_{gn} = dosage du granulat « n »,

C_{gn} = coefficient d'interaction qui dépend de la dimension du granulat (Tableau 2.1)

Tableau 2-1. Coefficients d'interaction en fonction de la dimension du granulat

Dimension du granulat	Cg min	Cg max	Cg moyen
0-2	1.7	2.00	1.85
2-7	0.95	1.12	1.03
2-7	0.66	0.91	0.78
4-7	0.54	0.69	0.62
7-14	0.10	0.22	0.16
7-20	0.00	0.13	0.07

Une autre étude plus minutieuse a été réalisée par [SERNA ROSE 1984] en utilisant la méthode de [BARON-LESAGE 1976]. Après une série des essais, SERNA est arrivé à proposer une relation empirique entre le module de finesse du béton sans fibres M_{io} et le module de finesse M_{ip} du béton ayant un pourcentage en fibres de P_i % :

$$M_{ip} = \frac{(M_{oi} - P_i).(M_i - 5.16)}{1.8} \quad (2-4)$$

Cette relation empirique est traduite sur la figure 2.2 et elle montre bien que plus le module de finesse du béton traditionnel est élevé, plus l'ajout de fibre entraîne une diminution importante du module de finesse du béton correspondant, c'est-à-dire une importante réduction des gros granulats. Par contre dans le cas de bétons fins l'introduction de fibres, dans un pourcentage inférieur à 1.5% ne modifie pratiquement pas ce module.

L'auteur remarque aussi qu'en faisant varier le dosage en ciment (entre 325 et 475 kg/m³), la granulométrie optimale ne se trouve pas modifiée (vérifiant ainsi un des postulats de la méthode de BARON-LESAGE).

Toutefois devant la diversité des fibres selon leurs propriétés mécaniques et rhéologiques mais surtout leurs propres problèmes de mise en oeuvre, une étude systématique de la formulation pour chaque type de fibres est impérative. Récemment, [ROSSI.P et al 1996] ont mis au point une méthode d'optimisation de la composition des bétons de fibres métalliques devant être utilisés dans des structures en béton armé. Cette méthode est basée aussi sur la méthode de [BARON-LESAGE 1976] mais contrairement à [SERNA ROS.1984], qui utilise le cône d'Abrams, cette étude a été réalisée avec le maniabilimètre L.C.L.

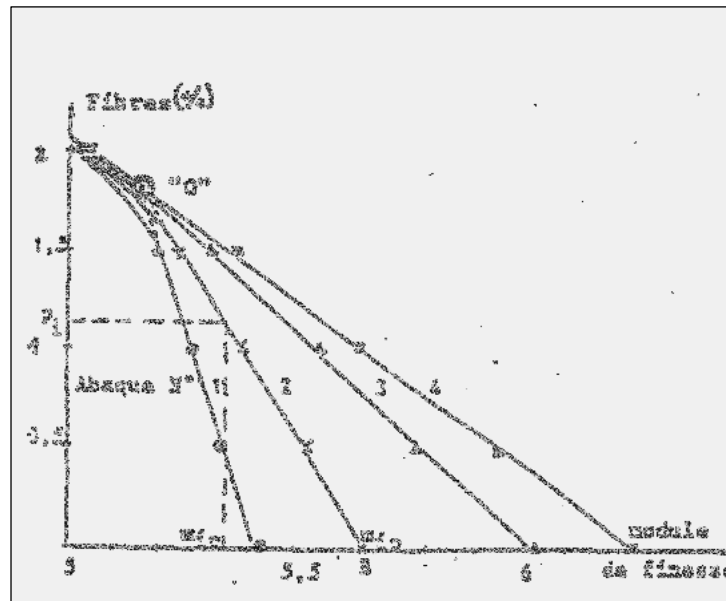


Fig. 2-2. Abaques reliant la composition granulair optimale de béton au % en fibres d'après SERNA

Le principe de cette formulation consiste à :

- Fixer au départ le rapport eau/ciment ainsi que le pourcentage des fibres à introduire dans le mélange.
- Déterminer le rapport optimum sable / gravier pour lequel la maniabilité est plus grande.
- Fait varier la quantité d'eau et de ciment ainsi que la quantité de superplastifiant afin d'obtenir la maniabilité souhaitée tout en respectant les recommandations de l'utilisation de la super plastifiant.

2.1.4. Technique de mise en oeuvre du béton de fibre

Le choix du procédé de mise en œuvre dépend du domaine d'application (dallage, éléments minces, béton massif, béton réfractaire ...etc.), des performances et des critères de production visés. Mais, dans le cas simple on peut incorporer dans un mortier ou micro-béton une certaine quantité de fibres longues de quelques centimètres, tout simplement comme un granulat additionnel dans un malaxeur ou une bétonnière. C'est là une technologie d'emploi immédiat et nous centrerons notre recherche sur elle. Mais, il est très important de noter que

d'autres techniques très performantes existent comme la projection ou le moulage par centrifugation.

L'addition de fibres à un béton traditionnel, comme on a déjà dit, pose très vite des problèmes d'élaboration, due à la réduction de la maniabilité du mélange. D'après les ravaux faits dans ce cas là, les propriétés rhéologiques du béton frais renforcé de fibres ne sont pas influencées uniquement par la géométrie des fibres et le volume incorporé, mais aussi par la taille, la forme et la fraction volumique des gros granulats et/ou des fines rajoutées.

D'après les recherches effectuées, la mise en oeuvre peut être limitée en deux facteurs Majeurs : La nature et la forme des fibres. [ODELBERG, G 1985], après une étude extensif, a montré que la longueur de fibre doit être adaptée dans chaque cas en fonction des techniques de mise en oeuvre retenues. La figure 2.3 donne une relation entre la longueur des fibres en mm et le pourcentage de fibres en volume.

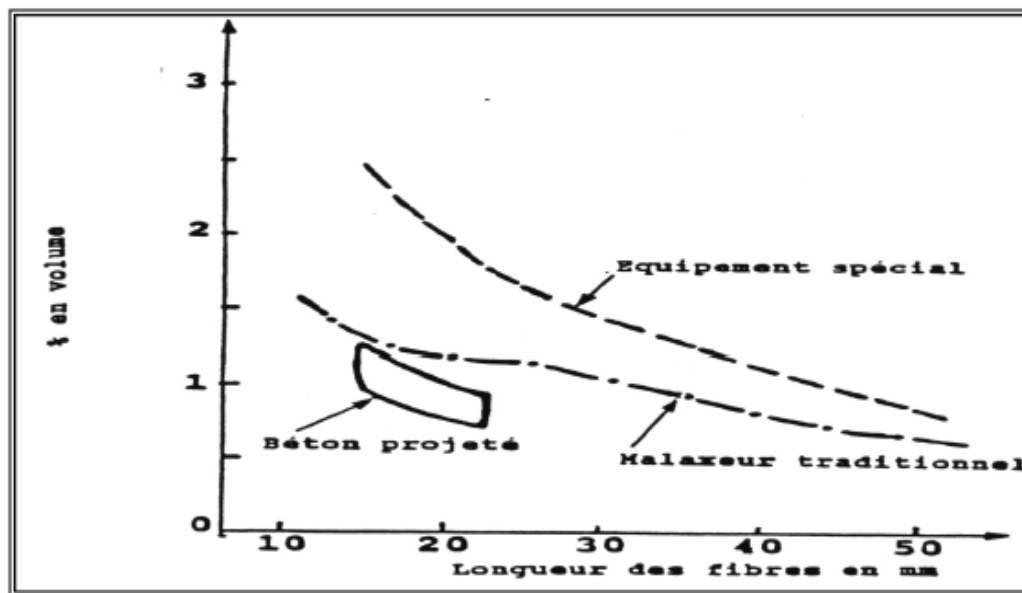


Fig. 2-3. Limites technologiques pour la mise en oeuvre du béton de fibres d'acier (G. ODELBERG-1985)

Il est clair que la mise en oeuvre est liée directement aux deux derniers paramètres (la longueur et le volume de fibres) et indirectement aux moyens utilisés pour l'emplacement de

ce composite dans leur coffrage ou bien dans leur place désirée. Pour cela, il apparaît une "limite pratique de faisabilité" que les chercheurs ont essayé de préciser.

Dans le cas de fibres d'acier c'est le non formation d'oursins qui sert de critère. Pour les rubans précédemment cités, [BOUCHEKOUK et al 1987] proposent de prendre la limite de linéarité dans la relation « Logarithme du temps d'écoulement au maniabilimètre en fonction du pourcentage de fibres ». Ainsi sont apparues des formules pratiques dont certaines intègrent la proportion des grains au-dessus de 5 mm. Enfin notons que plus la fibre utilisée est souple (module ou inertie) plus il est possible d'intégrer de fibres. Pour les fibres d'acier, les formules suivantes sont proposées pour définir le pourcentage massique ou volumique maximal de fibres intégrables (V_f) max :

$$V_f < 3 \frac{d}{l} \quad (2-5)$$

Avec d : diamètre de la fibre et l : longueur de la fibre

D'après [TATTERSALL et al 1974] le volume maximal de fibres doit être relié avec l'élanement de la fibre et masse des granulats supérieurs à 5 mm et la masse totale du béton.

$$V_f < \frac{600}{\lambda} (1 - A_g) \quad (2-6)$$

Avec V_f est proportion des fibres, en fonction pondérale

A_g = masse des granulats supérieurs à 5 mm / masse totale du béton

λ = élanement (longueur de la fibre sur son diamètre).

Alors que [EDGINTON 1973] a proposé une relation empirique entre la proportion de la matrice, en fraction pondérale, les masses volumiques de la matrice et de la fibre.

$$100 \frac{V_f}{V_m} < 75\pi \frac{g_f}{g_m} \frac{d}{l} k \quad (2-7)$$

Avec V_m est la proportion de la matrice, en fonction pondérale.

Les g_m , g_f sont la masse volumique de la matrice et la masse volumique de la fibre respectivement.

K est un coefficient qui dépend de la masse relative de la matrice, la masse des grains inférieurs à 5 mm et la masse relative des grains supérieurs à 5 mm. Il est donné par la formule suivante :

$$K = \frac{G}{G_m + G_g} \quad (2-8)$$

G_m : C'est la masse relative de la matrice moins la masse des grains inférieurs à 5 mm.

G_g : C'est la masse relative du grain supérieur à 5 mm.

Dans son étude publiée d'après [G. LIQUI,1986] est arrivé à élaborer une relation entre le volume de fibres incorporées dans le béton, la taille du plus gros granulats et les proportions de mélange du béton.

Cette relation est comme suite :

$$V_f < \frac{B}{\sqrt{d} - 16} * 1.08 \left(1 - \frac{D_{max}}{32.5} \right) \quad (2-9)$$

D_{max} : C'est la taille du plus gros granulats en mm.

B : C'est une constante dépendant des proportions de mélange du béton (valeur courante 1.8).

L'utilisation de plastifiant et de superplastifiant permet d'augmenter les pourcentages de fibres introduites en ayant un rapport $\frac{Eau}{Ciment}$ qui conserve de bonnes propriétés à la matrice.

Le rajout d'eau dans la matrice pour augmenter le pourcentage de fibres peut annuler pratiquement les gains de résistance mécanique obtenus avec les fibres.

Le déversement du béton doit s'effectuer de telle sorte que le moule ou le coffrage se remplisse aisément. Toute vibration doit être l'objet d'une étude attentive. Sauf cas exceptionnel, la mise en oeuvre à l'aiguille vibrante est à déconseiller du fait de l'orientation préférable des fibres et de l'effet de cheminée. Il est préférable d'utiliser des vibreurs de coffrage et des règles vibrantes.

Le talochage ne pose pas de problème quant à l'état de surface des éléments coulés à plat. Il a néanmoins comme inconvénient de faire apparaître quelques fibres sur les arêtes

périphériques supérieures qu'il convient de faire disparaître ensuite. Le coulage en bandes verticales remédie en grande partie à cet inconvénient en supprimant le talochage.

En général les propriétés rhéologiques de fibres dépendent principalement des caractéristiques du béton (matrice), du type de fibres et de façon significative de la méthode de fabrication.

L'introduction des fibres courtes distribuées uniformément et orientées de façon aléatoire dans les matériaux à base de ciment, diminue l'ouvrabilité, et augmente le volume des vides dans le composite. Du fait du très grand nombre de paramètres impliqués, la prévision de l'ouvrabilité des composites est difficile. Les facteurs qui influencent considérablement les caractéristiques des bétons de fibres frais sont : la teneur en granulats, la taille des granulats, la géométrie des fibres et la teneur en fibres.

2.2. PROPRIETES MECANIQUES DU BETON DE FIBRES

2.2.1. Introduction

Le principe de renforcement du béton par des fibres métalliques est nettement différent d'un renforcement par des armatures classiques.

Dans le béton armé, l'acier travaille fréquemment à sa contrainte maximale admissible; cela est possible lorsque les armatures sont suffisamment ancrées. Mais dans le béton armé de fibres lisses et droites (dans la plupart des cas); seul une petite longueur d'ancrage est souvent disponible. Cela veut dire que les propriétés mécaniques des bétons renforcés de fibres dépendent de façon générale de la qualité des fibres, de celle de la matrice et de l'adhésion entre elles. Donc, on peut conclure que la résistance des bétons faits de matrices contenant des fibres courtes discontinues est contrôlée essentiellement par la liaison inter-faciale et par la qualité de la fibre renforçant et en général aux différents paramètres schématisés ci-dessous.

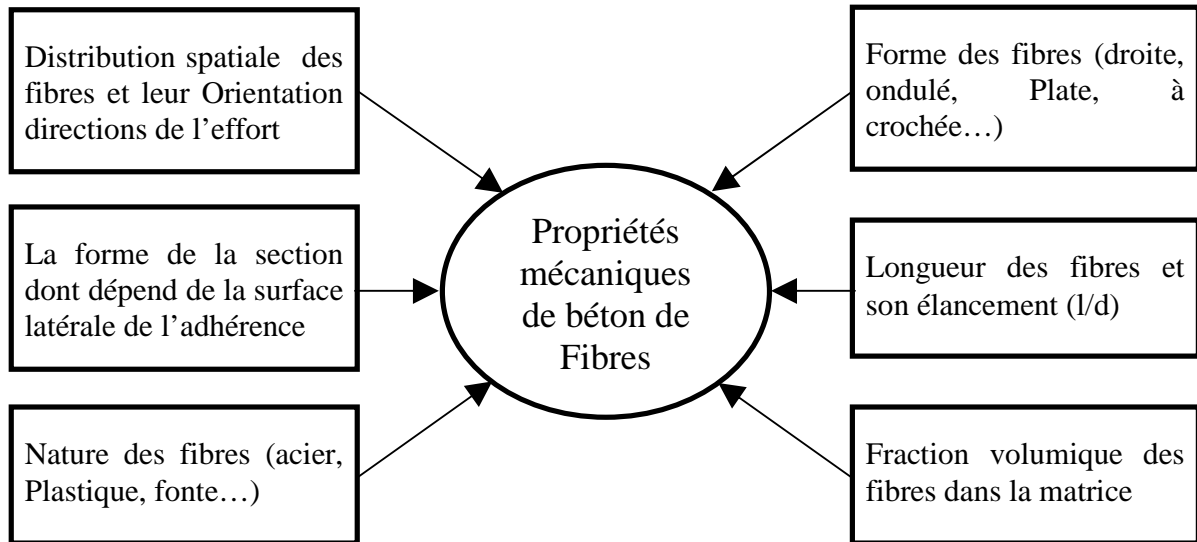


Fig. 2-4. Les différents facteurs influents sur la résistance de béton de fibres

1) Il est extrêmement difficile de déterminer l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influents est considérable.

2) L'introduction des fibres dans un béton modifie fortement la rhéologie ainsi que les caractéristiques intrinsèques du matériau à l'état durci, ce qui nous rend difficile de faire la comparaison entre un béton traditionnel et un béton renforcé de fibres ayant la même composition. Mais, le béton de fibres a fait l'objet d'un certain nombre d'essais mécaniques comparatifs classiques, afin d'évaluer les spécificités de ce béton par rapport au béton traditionnel.

3) La comparaison recommandée est basée sur le même dosage en ciment et la même ouvrabilité, d'où une composition différente en granulats. Une telle approche est significative pour les applications pratiques car l'ouvrabilité est souvent un paramètre imposé dans la mise au point d'une formule de béton.

La littérature est très abondante à ce sujet, par conséquent nous n'allons pas faire une bibliographie détaillée, mais de donner une synthèse des différents travaux faits et des différents résultats obtenus à partir des essais mécaniques les plus connus. Cette synthèse est suivie par un résumé sous forme d'un tableau.

2.2.2. Résistance en compression

La bibliographie montre que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression, et que la résistance à la compression n'est pas affectée que d'une façon insignifiante par la présence de fibres.

En revanche, l'accroissement de la déformabilité à la rupture que procurent les fibres peut-être une propriété intéressante en pratique. Mais l'absence de non remarquable influence de fibres sur la résistance du béton à la compression peut-être justifié par l'effet que la matrice est relativement forte à la compression, et la diminution de la résistance après avoir arrivé à son ultime est due largement à la rupture de l'adhérence agrégat pâte, alors que les fibres ne contribuent qu'après la rupture de la matrice, ce que veut dire qu'ils ont un faible effet sur la résistance de béton à la compression. Un certain nombre d'études citées ci-dessous, ont été faites dont l'influence des fibres se classe entre une augmentation négligeable, [BALAGURU, P,1994, BANTHIA, N et al,1995, - ROSSI, P et al;1996], et dans d'autres cas une augmentation de 15 à 20 %, avec un élancement de 100 et quelques fois une légère diminution [ROSSI, P et al;1996].

Johnson. et al [- JOHSTON, C.D ;1983], après une série des essais au laboratoire sur des éprouvettes cylindriques 300 x 150 mm² (avec des agrégats de $D \leq 15$ mm) et cubiques (100.100.100 mm³), ont rapporté qu'une amélioration peut-être obtenue lors de l'utilisation des fibres dans le béton (Fig.2.16). Ils sont arrivés à conclure que la présence de fibres d'acier permet un gain maximal de 15 % de la résistance en compression. [DARDAR. J] a montré cependant que la résistance peut-être diminuée par l'addition de fibres dans le béton .Il a conclu, dans son étude qu'à partir de $V_f = 0.5$ %, pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité. Suivant l'auteur cette diminution peut s'expliquer par une mauvaise homogénéité du béton et par une valeur E/C élevée, ou une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

En revanche de cette dernière conclusion, [GOPALARATNAM et al1985] ont montré dans leurs résultats statistiques faits sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 76 mm et de hauteur 152 mm sollicitée en compression, que la présence des fibres d'acier dans la matrice cimentaire augmente la résistance à la rupture de 35 % pour 1.5 % de fibres en volume, et la déformation correspondante à la résistance maximale augmente de 38 %.

Pour le module d'élasticité, ils ont montré que celui-ci obéit à la loi de mélange.

Cependant, ce module est de 9 % supérieure, dans le cas de 1.5 % de fibres à celui de béton non renforcé.

ROSSI a conclu dans son ouvrage publié récemment [ROSSI, P,1998] que les bétons de fibres métalliques, constitués de fibres longues, ont toujours des résistances en compression inférieure à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente. Tandis que, pour les fibres courtes, ROSSI a rapporté cette conclusion :

« Bien que l'augmentation des résistances en traction et en compression avec le pourcentage des fibres courtes soit le résultat le plus fréquemment attendu, et obtenu, on peut aboutir à une stagnation, voire une diminution de ces résistances pour certains pourcentages, notamment dans le cas de la compression.

Par ailleurs, si l'augmentation de résistance ultime en compression est peu affectée par la présence de fibres, la courbe contraintes-déformations est très différente et révèle un comportement beaucoup plus ductile du matériau. Ceci est bien confirmé par l'étude de SERNA ROS [1984], qui a observé que des déformations ultimes supérieures de 60 à 100% à celles mesurées sur les témoins. Cette déformation croît avec le pourcentage de fibres. Le module d'élasticité reste, par contre, pratiquement inchangé.

En général, le gain apporté par les fibres au béton n'est pas significatif mais la ductilité observée lors de l'essai favorise le jugement positif pour la présence des fibres dans un composite à matrice cimentaire. En complément, nous signalons qu'il semble exister un pourcentage de fibres donnant une valeur de résistance maximale, les fibres courtes semblent plus favorables. En plus de l'effet de la quantité des fibres, le type des fibres et la géométrie des fibres contribuent dans la détermination du gain apporté par la présence des fibres ainsi que d'autres paramètres comme la forme de l'éprouvette, la vitesse et la machine d'essais.

2.2.3. Résistance en traction

Il est bien connu que la réalisation d'un essai de traction digne de confiance pose de multiples problèmes et donc s'avère d'un coût élevé. Ceci conduit que les chercheurs qui ont emprunté cette voie difficile sont assez peu. La majeure partie des travaux sur le béton de fibres tente à améliorer le comportement en traction du béton seul qui est très fragile. Pour

évaluer les caractéristiques du béton de fibres, et les performances, on analyse les courbes charge-déformation ou charge-déplacement des éprouvettes soumises à la traction.

Dans le cas du béton sans fibres, le diagramme effort-déformation est caractérisé par une phase pratiquement linéaire qui aboutit, dès l'apparition de la première fissure, à la rupture fragile du matériau. Les fibres ne sont pas aussi efficaces dans le support d'effort de traction, bien que de modeste augmentation de résistance puisse se produire. Donc, les fibres sont ajoutées pour améliorer le comportement du matériau une fois la matrice est fissurée et ainsi de contrôler la fissuration du composite. Sur le diagramme effort - déformation du béton de fibres, on peut distinguer trois stades de comportement [Fig. 2.5] :

i : Le comportement pré-fissuration qui se caractérise par le processus de propagation de microfissures avant la formation d'un système de fissures continues au droit de la section critique au pic. Le comportement avant pic des composite cimentaire renforcé de fibres en traction dévié de la linéarité, quand la propagation des micro-fissures a déjà commencé. Le transfert élastique du cisaillement est le mécanisme principal à considérer pour la prédiction de la limite de proportionnalité ainsi que l'apparition de la première fissure dans le composite, à des stades de chargement plus avancés, le processus contrôlant le transfert de contrainte devient celui de glissement avec friction, car le décohéson se produit le long de transfert fibre - matrice. La contrainte de friction qui se développe est un cisaillement alors que des déplacements relatifs entre fibres et matrice ont lieu.

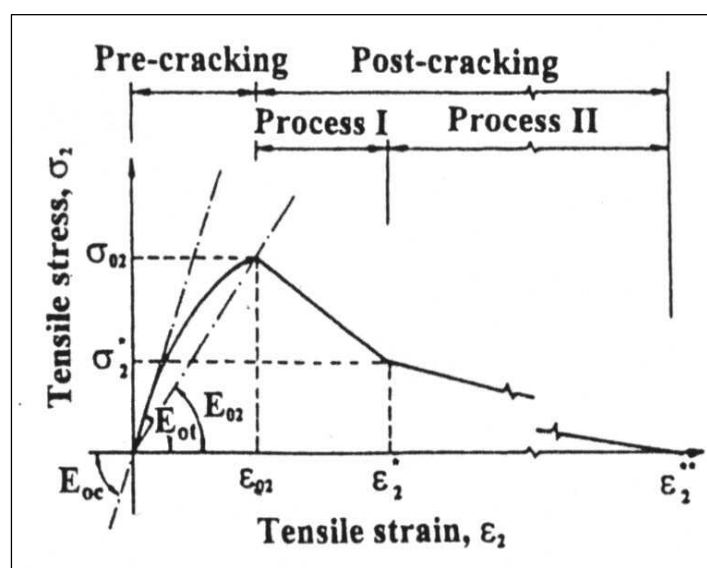


Fig. 2-5. Courbe contrainte -déformation [BEKAERT1986]

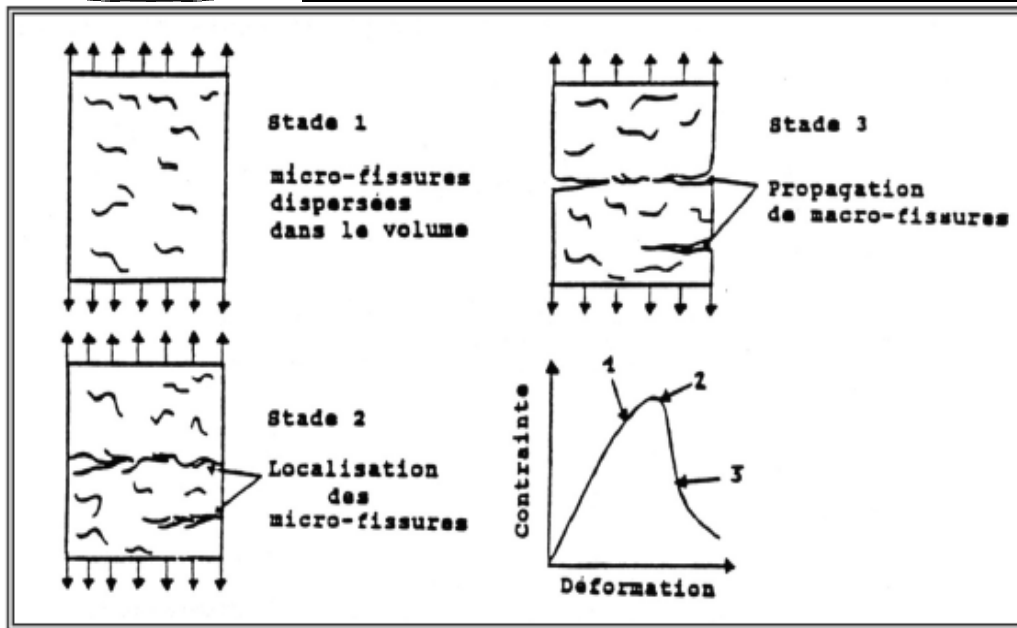


Fig. 2-6. Processus de fissuration du béton [-
CUSENS, A.R.]

ii -Le comportement post-fissuration qui est marqué par l'ouverture d'une seule fissure au niveau de la section critique qui transmet pratiquement toutes les contraintes de traction aux fibres traversant la fissure, à partir de ce moment c'est la décohésion et l'arrachement des fibres qui fournissent dans une large mesure la résistance à la traction après le pic.

iii-La propagation d'une macro-fissure se développe le long d'une section de l'éprouvette, perpendiculairement à la direction principale de traction. A ce stade la rupture de composite se fait soit par arrachement et glissement des fibres, soit par rupture des fibres reliant les lèvres des fissures. Quand les macro-fissures se forment, les fibres reliant les lèvres des fissures sont mises en traction ou cisaillement et sont sollicitées à l'arrachement.

Basant sur ce concept, les résultats fournis par [JOHNSTON et COLEMAN ;1974] montrent que la résistance de béton de fibres augmente de 5 à 30 % de la résistance en traction direct d'un béton non fibré. Ils ont aussi arrivé à formuler une relation qui donne la résistance à la traction d'une composite en fonction de la teneur de fibres et l'élanement des fibres.

Cette relation peut s'écrire comme :

$$\sigma_t = \left[1 + 0.015V_f \cdot \frac{l}{d} \right] \sigma_m \quad (2-10)$$

D'où , σ_m : la contrainte en traction de la matrice.

$\frac{l}{d}$: L'élanement des fibres.

V_f : Proportion volumique des fibres.

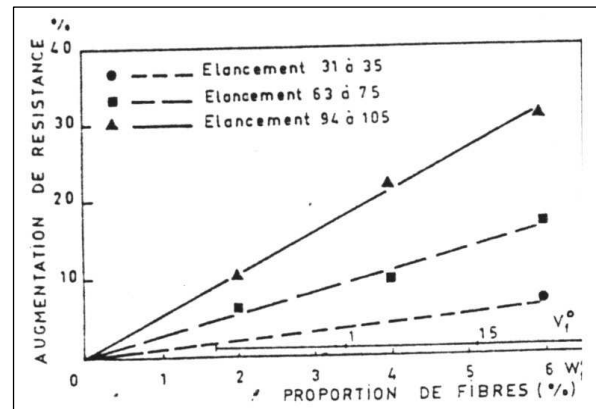
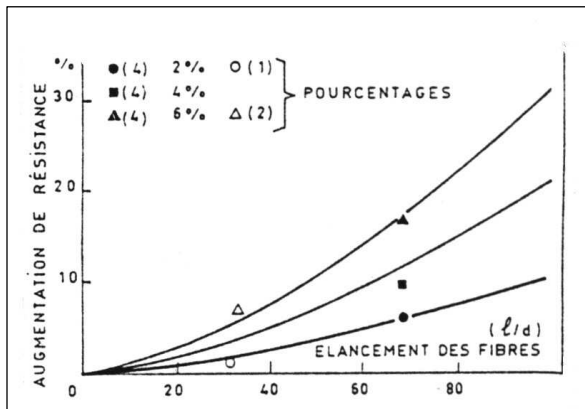


Fig. 2-7. Augmentation

$((\sigma_b - \sigma_c / \sigma_b * 100)) ((\sigma_b - \sigma_c / \sigma_b * 100))$
 de la résistance à la traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de la V_f pour différents élanements

Fig. 2-8. Augmentation de la résistance à la traction d'un mortier armé de fibres d'acier en fonction de la V_f pour différents élanements

L'équation (2.11) a l'intérêt de mettre en évidence les deux paramètres qui jouent un rôle primordial dans la résistance à la traction : la teneur en fibres à laquelle la résistance est directement et linéairement proportionnelle et l'élanement des fibres qui agissent dans le même sens de façon non linéaire. Les figures 2.7 et 2.8 illustrent la formule citée ci-dessus [SERNA ROS1984] qui a travaillé pour diverses compositions obtient des augmentations de 3% à 9 % de la résistance ultime du béton (Fig 2.14). Il a constaté aussi dans ses travaux que la présence de gros granulats diminue la résistance à la traction par rapport à un béton fin.

Cette remarque s'applique aussi aux déformations.

[DEHOUSSE] constate que les résultats obtenus font état en moyenne de majoration de l'ordre de 25 % de la résistance à la rupture pour des pourcentages de fibres de l'ordre de 2.5

% en volume [HANNANT]. Il a conclu que ces résultats ne sont donc que des améliorations marginales et en tout cas sans commune mesure avec résultats apparents obtenus en flexion

[BALAGURU 1987] suggère, après une série des travaux dans le laboratoire, que l'effet des fibres en traction peut-être négligé si le teneur en fibres est inférieur à 2 % du volume.

Alors que [MAJUMDAR, A.J]; après une série des essais de traction sur le ciment armé de fibres de verre orientés au hasard dans le plan, parle d'une augmentation de plus de 20 % à une pourcentage en volume égal à 8 % dont l_f est de 40 mm. En règle générale, la résistance à la traction de béton de fibre augmente avec la longueur et le volume des fibres mises en place, elle dépend de l'orientation des fibres par rapport au sens des efforts et elle est influencée par la granulométrie de la matrice. Aussi, il est remarqué que le module d'élasticité reste pratiquement inchangé et la courbe contrainte - déformations montre une certaine ductilité du matériau au-delà de la contrainte ultime.

Cette loi de comportement est une loi locale applicable dans la zone fissurée d'une éprouvette en traction. On peut noter ici que la poursuite de l'essai après le pic de contrainte s'avère extrêmement difficile à cause de la fragilité du matériau ; il y a une séparation totale de l'éprouvette en deux fragments dans la plupart des cas. Seule la méthode d'essais par cycles charge décharge permet d'obtenir, difficilement des courbes complètes.

2.2.4. Résistance en flexion

Il est bien connu que dans les utilisations courantes, les bétons de fibres sont souvent soumis à des contraintes de flexion, et c'est là que l'ajout des fibres dans le béton a les conséquences les plus marquées. Ces contraintes là représentent la capacité de résistance de ce matériau (béton de fibres). Cette résistance est habituellement présentée par le diagramme charge flèche d'une poutre soumise en flexion (3 ou 4 points) comme il est représenté dans la figure 2.2.4. Ce diagramme se caractérise par deux points :

1 - Un point « A » correspondant à la fin d'une partie linéaire est dénommé limite de proportionnalité. Il correspond en fait à la première fissuration de la matrice.

2 - Un point « B » correspondant à la rupture du composite. La contrainte correspondante au point B est appelée contrainte ultime pour certains, ou module de rupture par d'autres.

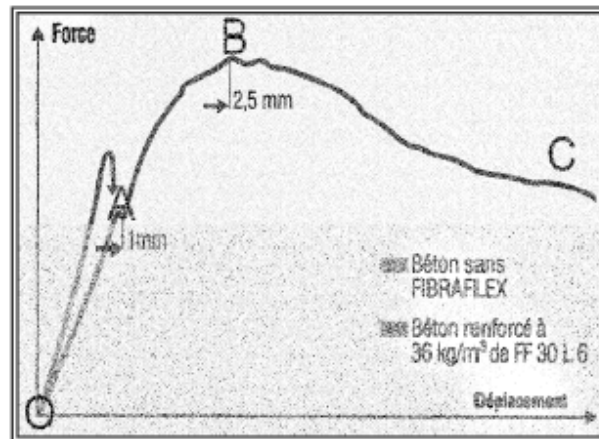


Fig. 2-9. Relation entre la charge et déformation de béton avec et sans fibres

Entre O et A, on retrouve la même allure de comportement que pour la matrice seule sur la courbe force-déformation. Le rôle de la matrice est très important dans cette zone.

Cependant, les fibres en apportant un soutien aux zones faibles, ont pour effet d'homogénéiser la répartition des efforts internes, ce qui contribue à augmenter l'importance du domaine linéaire. Zone OA est à permettre le développement d'un écoulement important avant l'apparition de la première fissure au-delà du point A.

Le gain appréciable est celui réalisé sur la formation de première fissuration. Au-delà du point A, il y a développement d'une micro-fissuration, les fibres jouant un rôle important pour la reprise des efforts. Au point B la contribution des fibres inférieures est maximale. Au-delà de ce point, les fibres inférieures se décharge. En général, les fibres d'acier peuvent améliorer nettement la résistance à la flexion dans le cas de forts dosages en fibres.

Les essais de flexion sont réalisés à vitesse de déformation constante, une transformation très significative de la courbe effort-déformation est généralement constatée et qui fait apparaître un accroissement faible ou nul de la résistance à la première fissuration et une résistance parfois supérieure après la première fissuration qui s'étend sur une fortes déformations.

Une étude étendue de la majorité de données disponibles a été faite par Johnston]. Il a examiné ses propres résultats avec ceux de [SNYDER et LUKE, LANKARD, MONFORE, WATERHOUSE]. Il est arrivé à combiner ces deux paramètres en un seul paramètre (W. d l)

où il a constaté que la relation entre la résistance en flexion et le produit $w. d l$ est fondamentalement linéaire (Fig. 2.10).

DEHOUSSE [ACI 544,1973] dans son article, publié par RILEM, est arrivé à combiner aussi les deux paramètres $W. d l$, où il a confirmé la conclusion de JOHNSTON (Fig. 2.11).

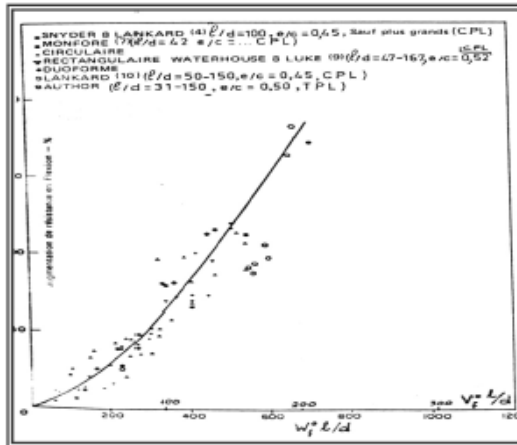


Fig. 2-10. Augmentation de la résistance à la flexion en fonction de $(W.l/d)$ [DEHOUSSE, N et al 1974]

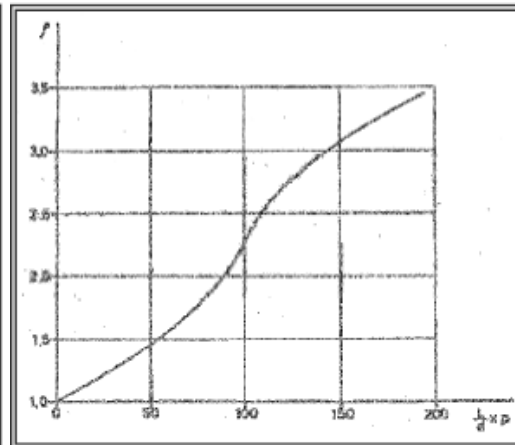


Fig. 2-11. Augmentation de la résistance à la flexion en fonction de $(W.l/d)$ [DEHOUSSE, N.M]

Les données élaborées par THE UNITED STATES STEEL CORPORATION montrent une relation identique de celle de JOHNSTON et DEHOUSSE. Les travaux réalisés par SERNA ROS [1984] montrent aussi que la charge de rupture en flexion peut-être améliorée jusqu'à 150 %, et la flèche multipliée par 8.

Alors que d'après les travaux de J. [EDGINGTON 1973, JOHNSTON ;1996], on peut conclure que le paramètre teneur en fibres pour le béton de fibres joue un rôle important dans le comportement de béton de fibres en flexion et modifie d'une façon remarquable la microfissuration ainsi que la macro -fissuration de ce matériau. Les travaux de J.EDGINGTON et al peut-être bien représentés par la figure 3.12 et figure3.13. Dans un rapport publié par [A.C.I COMMITTEE 544 .1973], les auteurs confirment que les fibres métalliques, introduites jusqu'à 4% par volume, ont été trouvées qu'ils augmentent la résistance de la première fissure deux fois et demi plus de celle de béton non renforcé de fibres. Dans une autre étude pratique faite par [SCHNUTGEN 1978] et suivant la norme DIN1048, il a constaté que la résistance de

béton de fibres à la flexion augmente considérablement et que cette augmentation est reliée directement à la teneur de fibres, l'élanement et la forme de fibre ainsi que la surface de fibres ajoutées. Il est arrivé à confirmer, qu'un élanement varie entre 90 et 125, donne une bonne compromise entre l'ouvrabilité de béton de fibres et la résistance ultime à la flexion.

[ACI 544 , 1973] propose une formule à deux constants pour le calcul des composites à matrice fragile :

$$\sigma = A\sigma_m(1 - V_f) + BV_f \frac{L}{D} \quad (2-11)$$

Avec A est le coefficient de correction de l'analyse de régression de la courbe $\sigma / (V_f \cdot \frac{L}{D})$ en fonction de $\sigma_m(1 - V_f) / V_f \frac{L}{D}$. Ce coefficient doit être proche de l'unité.

B est un coefficient qui dépend de la liaison fibre matrice et de l'orientation des fibres

D'autre part [SWAMY] établit une formule de régression qui permet de prévoir la résistance à la flexion d'un béton de fibres, en fonction de celle de béton sans fibres :

$$\sigma_c = 0.97\sigma_m(1 - V_f) + 3.14V_f \frac{l}{d} \quad (2-12)$$

Ou σ_c : résistance à la flexion du béton de fibres

σ_m : résistance à la flexion du béton témoin,

V_f : pourcentage des fibres, en volume, et l/d : élanement des fibres

Alors que, d'après [V.S.PARAMESWRAN et R.RAJA], on peut écrire le rapport entre la résistance de flexion de béton et celle de béton armé de fibres sous la forme :

$$R = 1 + \left(A \frac{l}{d} - 1 \right) - B \left(\frac{l}{d} \right) V_f \quad (2-13)$$

B est voisin de zéro pour la distribution triaxiale de fibre. On note ici que dans la formule ci-dessus, ainsi que dans la formule simplifiée :

$$R = 1 + \left(A \frac{l}{d} - 1 \right) \quad (2-14)$$

Ou A : contient implicitement l'influence de l'adhérence ; c'est pourquoi il est très différent d'un auteur à l'autre (0.69 pour LUKE et WATERHOUSE 0.47 pour KAR et al)

[HANNANT ;1978] en basant sur le travail de Allen, est arrivé à représenter le comportement de béton de fibres en flexion par des équations simples, qui tiennent compte l'orientation, et la teneur des fibres et l'adhérence fibre-matrice.

$$1-D : \quad \sigma_{mR} = \tau V_f \frac{l}{d} \frac{39}{16} = 2.44 \tau V_f \frac{l}{d} \quad (2-15)$$

$$2-D : \quad \sigma_{mR} = \tau V_f \frac{l}{d} \frac{39}{\pi 8} = 1.55 \tau V_f \frac{l}{d} \quad (2-16)$$

$$3-D : \quad \sigma_{mR} = \tau V_f \frac{l}{d} \frac{39}{32} = 1.22 \tau V_f \frac{l}{d} \quad (2-17)$$

Ce que montre, d'après ces équations :

- Que la résistance ultime en flexion (MOR) dépend uniquement au volume, forme et l'orientation de la fibre ainsi que la résistance de l'adhérence fibre-matrice et non pas sur la résistance de la matrice, malgré que cette dernière peut séparément influencer sur l'adhérence.

- La résistance ultime apparente augmente en proportion avec V_f et l/d , ce qui est tout d'accord avec les travaux donnés confirmés par Johnston.

- La résistance ultime pour 1-D est deux fois que celle de 3-D.

En général, comme tout matériau nouveau, le béton de fibres a fait l'objet des études extensives basées sur des essais mécaniques, et afin d'évaluer son comportement en flexion par rapport au béton traditionnel, nous allons essayer de donner une synthèse des différents résultats obtenu à partir des essais mécaniques les plus connus. Cette synthèse est proposée sous forme d'un tableau présenté ci-dessous :

Auteurs	Résumé des résultats des travaux effectués par l'auteurs
SHAH, SP & RANGAN, BV (1971)	-Une augmentation de la résistance à la flexion mais n'est pas comparable avec celle de la ductilité. Avec 1.25% du volume de fibres R_f (résistance à la flexion de béton de fibres) Augmente deux fois de celle de béton sans fibres, mais la ductilité est de l'ordre 20 plus de celle de béton sans fibres.
JOHSTON & GRAY (1986)	-Ils constatent que la résistance à la flexion de béton de fibres dépend largement des caractéristiques de la matrice et très peu des caractéristiques de fibre tendit que la ductilité manifestement indépendante de la matrice et fonction des caractéristiques des fibres
HUGHES & FATTUHI	-La résistance de la première fissure augmente d'une manière linéaire avec la teneur de fibre dans le béton, ils à rapporté une augmentation de 15% de R_f en utilisant 1.5% de volume de fibres
SWAMY & MANGAT	-Ils parlent d'une augmentation 40% de la résistance de la flexion de béton renforcé avec 1.5% par volume de fibres.
SCHNUTGEN & al	Ils en trouvé que avec l'addition de 1.5% par le volume de fibres dans le béton, la résistance à la flexion augmente avec 25% que celle de béton non renforcée.
SWAMY	Après une étude extensive, il a conclu que la résistance en flexion de béton de fibres (pour plusieurs pourcentages des fibres) diminue lorsque la taille de s granulats augmente
SNYDER & LANKARD	Avec l'addition de 1.5% par volume de fibres, la résistance à la flexion de béton de fibre améliore d'une façon significative que celle de béton non renforcée, ils ont constaté que cette augmentation atteindre 60%
EDINGTON et al	Avec 2.5% de volume de fibres la résistance de BF Augmente de 90 à 140% de celle de béton non renforcée. Cette augmentation dépend principalement à l'élanement des fibres mais peu moins aux caractéristiques des fibres
TAT SENG -LOK	Une grande condensation de fibres tend vers une bonne performance alors que la contrainte d'adhérence fibres-matrice a une influence majeure sur le comportement de béton de fibres à l flexion
ATTAR & MASUREUR	le comportement global de la structure (béton renforcé par fibres) est amélioré puisque, l'énergie de post-fissuration du matériau augmente.
WILLIAMSON & KNAB	L'addition des fibres augmente la résistance à la flexion et la ductilité de béton de fibres après la première apparition des fissures.
GNUASEKARAN	L'addition fibres améliore bien la résistance à la flexion et aussi la ductilité. L'élanement bas acte stoppeurs des fissures alors s que le grand élanement contribue à augmenté la ductilité de béton de fibres

CHAPITRE 3: CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISEES ET LES METHODES D'ESSAIS

3.1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente à la fois les matériaux que nous utiliserons, et les méthodes qui seront mises en œuvre dans la suite de ce travail, après on exposera les caractéristiques chimiques et minéralogique de ces matériaux puis le plan expérimental de notre étude.

3.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

3.2.1. Le Laitier

Dans notre étude on a utilisé le laitier granulé de haut fourneau de complexe sidérurgique d'El-Hadjar, Les analyses chimiques sont effectuées au niveau de laboratoire de la cimenterie de AIN-TOUTA.

3.2.1.1. Analyse du laitier

Tableau 3-1. Composition chimique du laitier

Les composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	S
(%)	40,80	5,2	0,53	43,01	6,4	3,02	0,8

La qualité du laitier est appréciée par deux modules :

3.2.1.2. Propriétés physiques de laitier

- Masse volumique apparente = 1080 kg/m³.
- Masse volumique absolue = 2733 kg/m³.
- Surface spécifique = 3500 cm²/g.

3.2.2. Le Ciment portland

Le ciment qu'on a utilisé est un ciment portland composé, provenant de la cimenterie d'AIN-TOUTA, dont la composition chimique et minéralogique est représentée ci-dessous:

3.2.2.1. Analyse chimique et minéralogique du ciment: [fiche technique - Décembre 2005]

Tableau 3-2. Composition chimique et minéralogique de ciment

Composition chimique (%)						Composition minéralogique (%)					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Chaux libre	Résidu insoluble	Perte au feu	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20,34	5,37	3,00	61,69	1,8	0,97	1,12	5,03	58,09	23,32	8,32	10,27

3.2.2.2. Propriétés physiques de ciment

- Masse volumique apparente = 1215 kg/m³.
- Masse volumique absolue = 3150 kg/m³.
- Surface spécifique = 3371 cm²/g.

3.2.3. Le filler calcaire

Les fillers proviennent de la carrière géante (E.N.G) d'El Khroub, près de Constantine.

Ils sont de nature calcaire. La composition chimique est représentée au-dessous.

Tableau 3-3. Composition chimique d'un filler calcaire.[laboratoire de la cimenterie d' AIN-TOUTA].

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	NaCl	PF
0.58	0.02	0.06	55.80	0.06	0.08	0.56	43.53

3.2.3.1. Propriétés physiques de filler calcaire

- Masse volumique apparente = 1530kg/m³.
- Masse volumique absolue = 2720 kg/m³.
- Surface spécifique = 3000 cm²/g.

3.2.4. Le sable

Le sable qu'on a utilisé provient de la région de Biskra (rivière d'Oued-Djedi).

3.2.4.1. Analyse granulométrique**Tableau 3-4.** Analyse granulométrique du sable

Ouvertures de mailles (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
5,000	0,00	0,00	0,00	100,00
2,500	190.0	190.00	9.5	90,50
1,250	210.00	400.00	20.00	80,00
0,630	480.0	880.00	44.00	56,00
0,315	610.00	1490.00	74.5	25,50
0,160	290.0	1780.00	89.00	11.00
0,080	120.00	1900.00	95.00	5
Le fond	98	1998	99,9	0,10

3.2.4.2. Propriétés physiques de sable

- Masse volumique apparente = 1440 kg/m^3 .
 - Masse volumique absolue = 2500 kg/m^3 .
 - Module de finesse = 2,37.
 - Equivalent de sable : visuel = 67,00.
- Par piston=72,5.

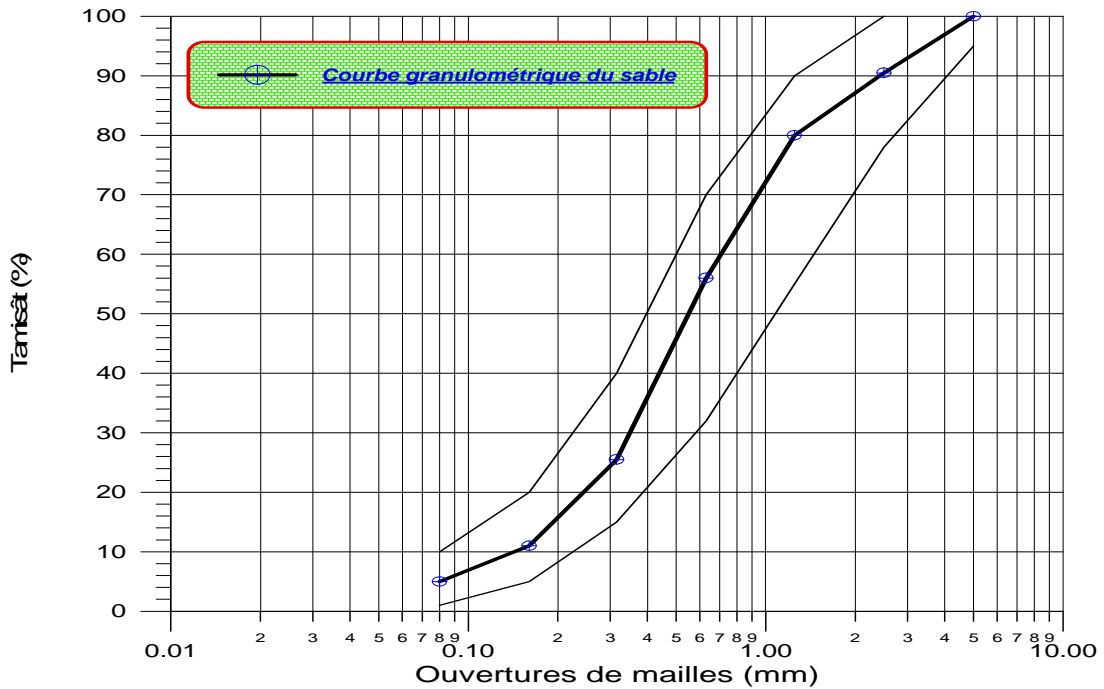


Fig. 3-1. Analyse granulométrique du sable

3.2.5. Les Graviers

Nous avons utilisé des pierres concassées de la région de Biskra, le tableau suivant nous montre leur analyse granulométrique.

Tableau 3-5. Analyse granulométrique du gravier 7/15

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (%)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
	7/15	7/15	7/15
25.00	0.00	0.00	100
20.00	0.00	0.00	100
16.00	1.24	1.24	98.76
12.50	48.16	49.4	50.60
10.00	31.36	80.76	19.24
8.00	13.32	94.08	5.92
6.30	5.2	99.28	0.72
5.00	0.24	99.52	0.48
Le font	0.48	100	0.00

Tableau 3-6. Analyse granulométrique du gravier 3/7

Ouvertures des mailles (mm)	Refus partiel (%)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
	3/7	3/7	3/7
10.00	0.00	0.00	100
8.00	18.74	18.74	81.26
6.30	38.36	56.10	43.90
5.00	35.45	91.55	8.45
4.00	1.79	96.34	3.66
3.15	0.65	98.05	1.95
2.50	1.30	98.70	1.30
Le font	3.71	100	0.00

3.2.5.1. Propriété physique du gravier

- **Propriété physique du gravier (3/7)**

- Masse volumique apparente = 1308

- Masse volumique absolue = 2608

- Coefficient de Los Angeles = 22%

- **Propriété physique du gravier (7/15)**

- Masse volumique apparente = 1330 kg/m³

- Masse volumique absolue = 2590 kg/m³

- Coefficient de Los Angeles = 22 %

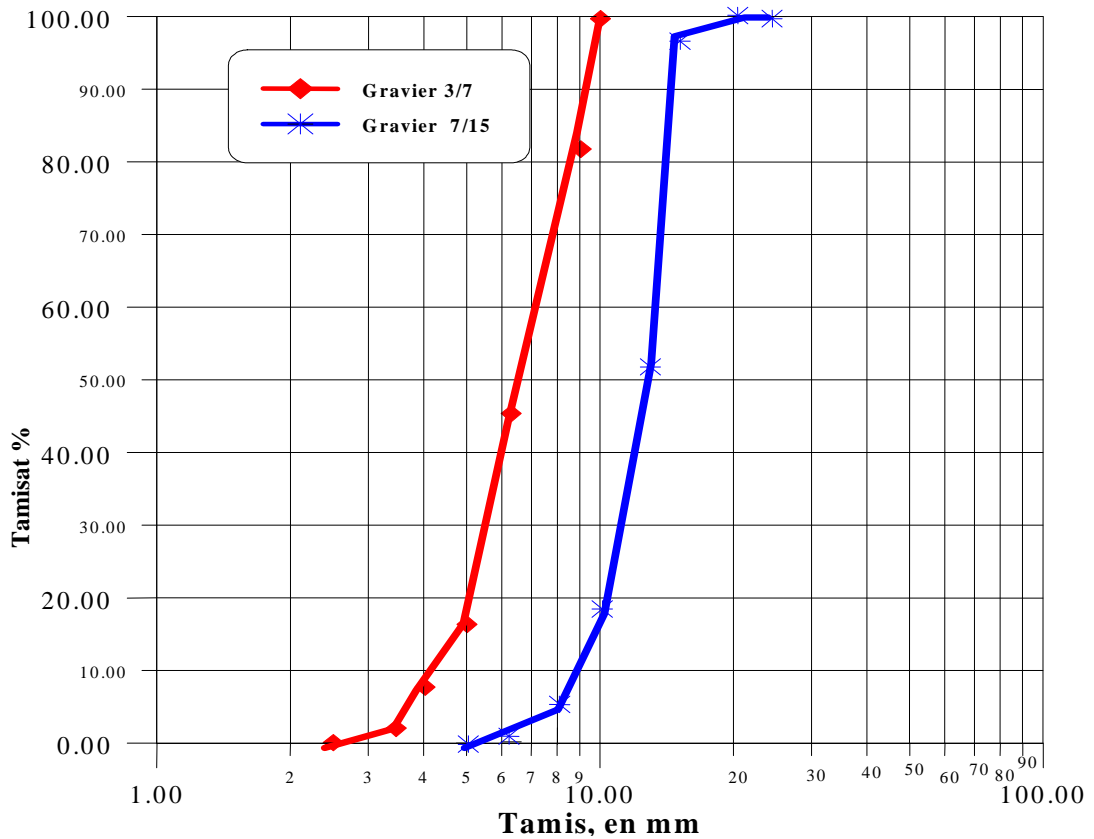


Fig. 3-2. Courbe granulométrique du Gravier

Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable et gravier s’inscrit dans le fuseau recommandé par le mortier et le béton courant.

3.2.6. Fibres métalliques

Leurs propriétés géométriques des fibres sont présentées ci-dessous :

Type de fibre	Longueur mm	Largeur mm	Epaisseur mm	Diamètre mm	Masse volumique (kg/m3)
Fibres D’acier	50	-	-	0.62	7800

3.2.7. Fibres polypropylène

Type de fibre	Longueur mm	Largeur mm	Epaisseur mm	Diamètre mm	Masse volumique (kg/m ³)
Fibres polypropylène	0.5à 4	5à 75	-	-	900

3.3. PLAN EXPERIMENTAL**3.3.1. La préparation des échantillons**

Durant notre étude on a utilisé pour la confection des échantillons des moules de dimensions (20 x 20 x 20)mm³ pour l'étude de la pâte de ciment et des moules de (40 x 40 x 160)mm³ pour l'étude du mortier et béton des moules cylindriques de (16 x32) , cubique de (10 x10 x10) mm³

L'étude a été basée sur l'utilisation d'un ciment portland composé avec l'addition de matières minérales telles que: le laitier de haut Fournaux et la matière calcaire séparément et avec différents pourcentages. Le but envisagé est l'évaluation du taux de participation de ces ajouts et leur influence sur la résistance mécanique en fonction du temps,.

1) Pour la pâte de ciment on a utilisé un ciment portland composé (CPJ) de résistance caractéristique (42.5 Mpa) pour un poids de (20±2) g et d'un rapport E/C entre les rapports (0.45÷0.50) avec les différentes additions minérales précédemment citées.

2) En ce qui concerne le mortier, on a utilisé le sable d'oued avec un taux constant de (1350±2)g en conservant le même rapport E/C cité précédemment avec le changement de la quantité d'eau suite au changement du rapport E/C.

3) Pour le béton en plus de confection du mortier citée précédemment_ en a ajouté le gravier concassé de la région de Biskra avec toujours le même rapport E/C.

CHAPITRE 4: ETUDE DE LA PÂTE DU CIMENT, MORTIER ET DU BETON

INTRODUCTION

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime d'un squelette granulaire et d'un liant qui est la pâte de ciment hydratée. L'étude de la technique du béton amène à celle de la structure du mélange et des facteurs déterminant la résistance, la durabilité du béton. Si l'on recherche une résistance à la traction, on devra en outre, s'assurer d'une bonne adhérence entre les liants et l'agrégat et d'un parfait enrobage. Une qualité qui paraît avoir aussi une grande importance est l'étanchéité, c'est elle qui s'oppose au passage des fluides et à la corrosion des armatures. Le béton est d'autant plus étanche, qu'il est plus compact et gâché avec moins d'eau.

4.1. ETUDE DE LA PATE DU CIMENT

4.1.1. La résistance à la compression

Dans cette partie, il s'agit des essais de compression sur la pâte de ciment avec et sans ajouts pour obtenir le pic de cette dernière puis contenue notre recherche

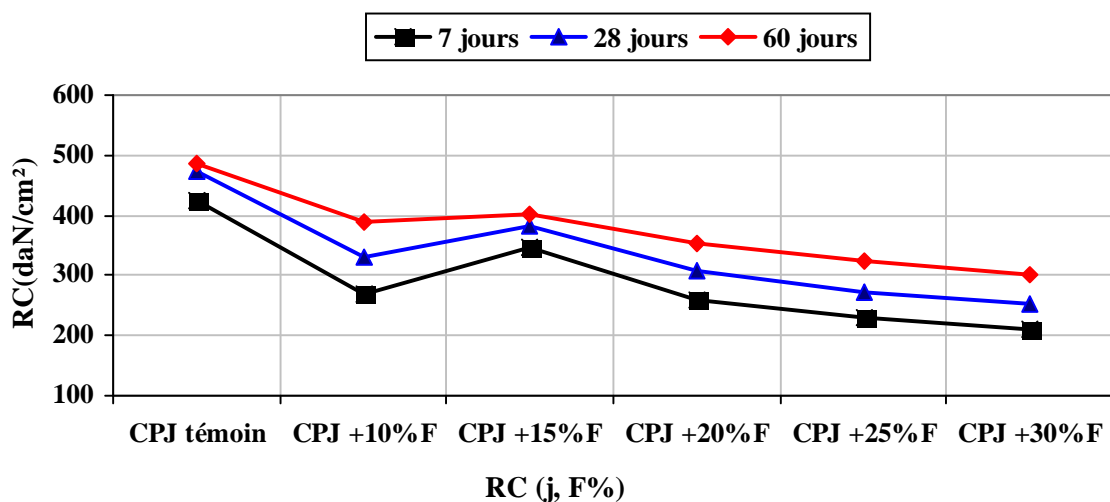


Fig. 4-1. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler $E/C = 0.45$

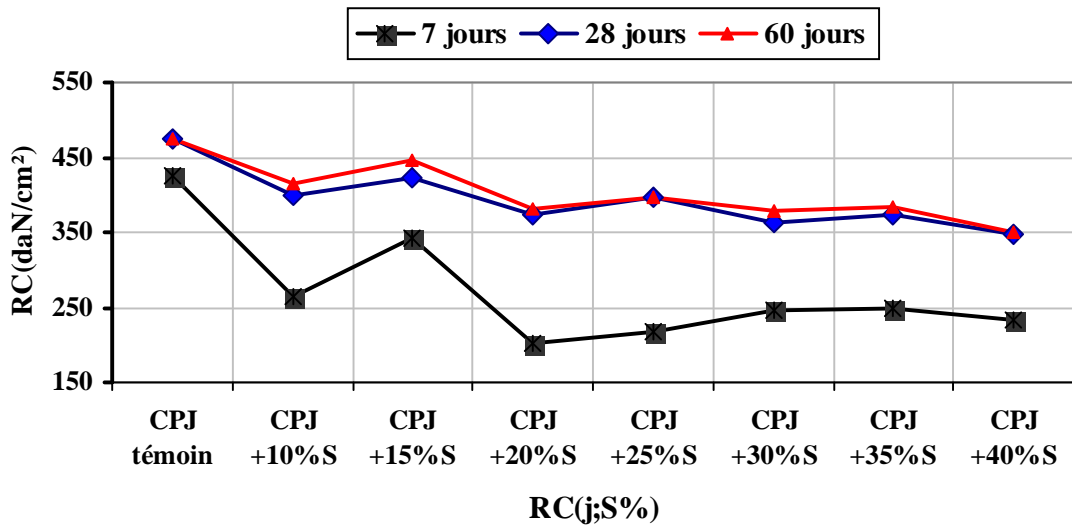


Fig. 4-2. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier $E/(C+S) = 0.45$

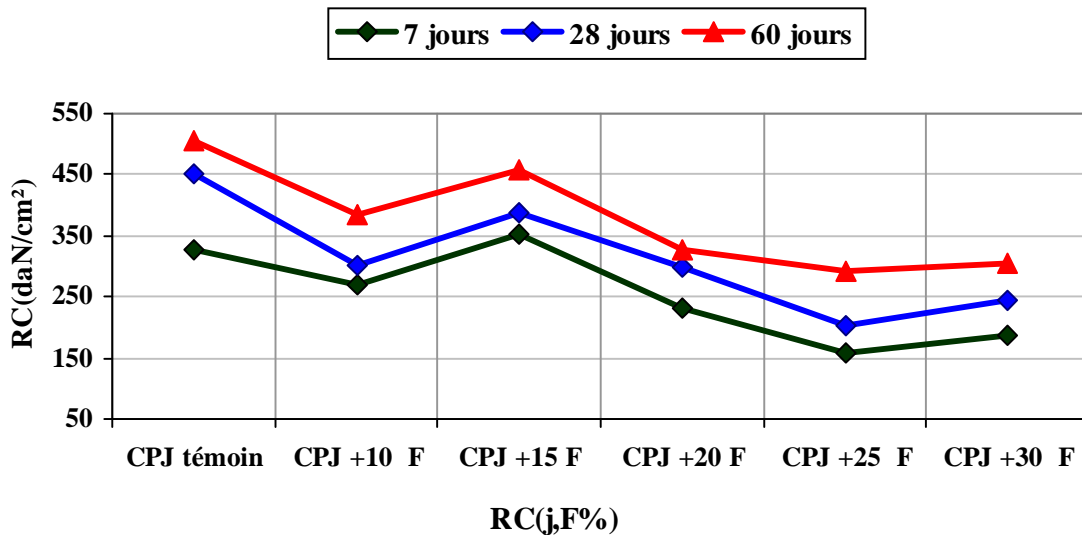


Fig. 4-3. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de filler $E/C = 0.5$

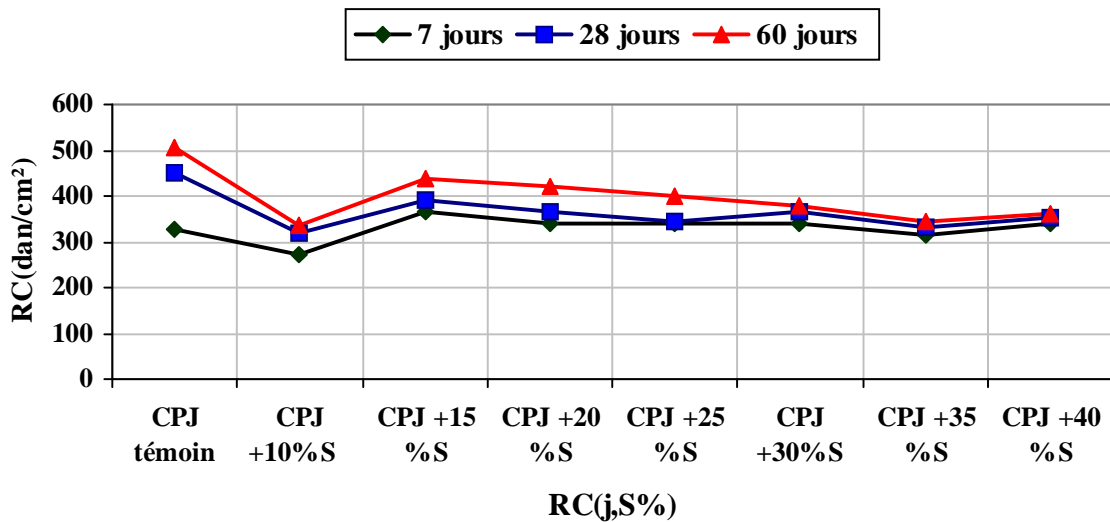


Fig. 4-4. Evolution de la résistance à la compression des ciments durcis à l'état naturel en fonction du temps et du pourcentage de laitier $E/(C+S) = 0.5$

COMMENTAIRE

D'après les résultats obtenus (Figure 4-1. à figure 4-4.), on remarque que l'ajout de 15% de laitier permet une augmentation de la résistance mécanique à la compression du ciment en fonction du temps de durcissement dans les conditions naturelles au delà de cette valeur nous observons une dégression de la résistance avec l'augmentation de pourcentage d'ajouts, sauf l'intervalle entre (25et 30)% de laitier nous apercevons une évolution de la résistance mais elle reste inférieure à la résistance trouvée de 15%S.

-Et pour la pate du ciment contenant le filler, nous apercevons que le pourcentage de 15% du filler fait augment la résistance mécanique la compression et pour les autres pourcentages nous remarquons qu'il y'a une dégression de la résistance en fonction du temps.

L'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes (laitier et calcaire) dans la pâte permet d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de ces derniers. Ces ajouts réagissent par leur finesse et leur activité pouzzolanique engendrant un squelette plus dense et par conséquent un mortier plus résistant et plus durable.

Cette augmentation est due à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et la microstructure du matériau obtenu.

4.1.2. Propriétés physiques du liant

Le choix de la composition optimale du ciment avec le laitier et le filler en fonction des critères physico-mécaniques et productif.

Vu les caractéristiques mécaniques que représentent les liants (CPJ avec une substitution allant jusqu'à [15%] de laitier et [15%] de filler calcaire étudiés précédemment, nous avons choisi ces deux liants pour terminer notre étude.

4.1.2.1. Consistance et prise

Il y a lieu d'expérimenter deux choses:

- La quantité d'eau nécessaire au gâchage (par l'essai de consistance).
- La durée de prise (par l'essai de prise).

Les ciments Portland composés avec laitier et filler se distinguent par une prise lente et un durcissement ralenti à sa période initiale. En comparaison avec un ciment portland composé sans ajouts.

4.1.2.1.1. Influence de la quantité de filler et de laitier sur la consistance et la prise

La consistance ainsi que les temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction de la quantité de laitier et de filler introduit sont donnés par les figures [3-5; 3-6]:

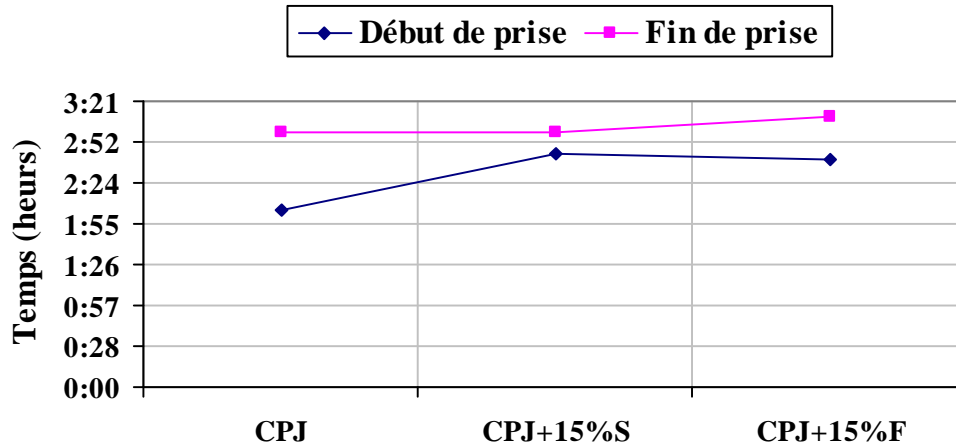


Fig. 4-5. Temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler

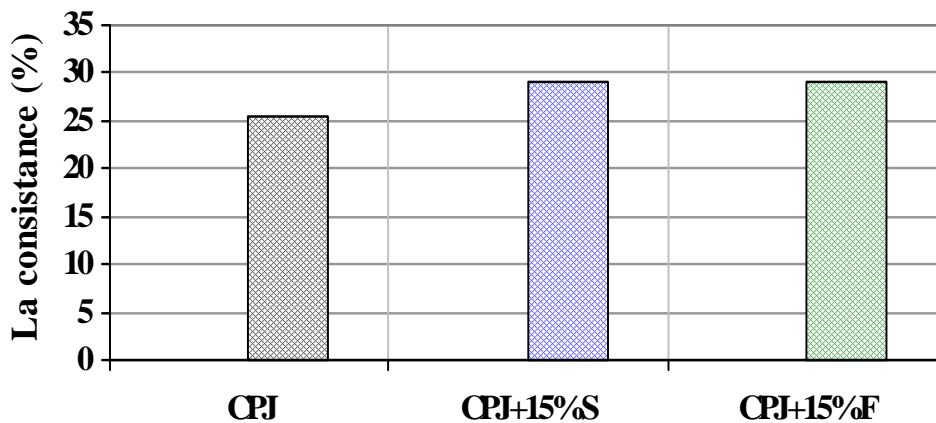


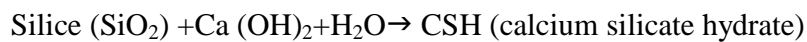
Fig. 4-6. Variation de la consistance de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler

COMMENTAIRE

D'après les résultats obtenus (figure4-5.) on remarque que l'augmentation de la teneur en ajout de liant de 15 %, donne un double effet:

- Augmentation de la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance normale.
- Retardement de la prise.

D'après la même figure on voit nettement que les temps de début et de fin de prise augmentent avec l'augmentation de la quantité d'ajout. Cela s'explique par le fait que la réaction est retardée à court terme. Ce qui veut dire aussi que la cinétique d'hydratation du liant devient de plus en plus lente en fonction de la diminution de l'ajout pouzzolanique par rapport au laitier pour 15% et inerte de 15% pour le filler d'addition. Par conséquent les cristaux de CSH (responsables du durcissement de la pâte) existent en faible quantité aux très jeunes âges.



D'après la (figure 4-6) on remarque que par l'addition progressive de l'ajout le besoin en eau augmente sensiblement.

4.1.2.1.2. Le gonflement

Le gonflement est engendré par l'expansion de certains éléments provoquant à long terme des anomalies à la résistance et présentant après la prise des fissures dans la masse du liant. En appliquant l'essai de Le Chatelier, on a pu calculer le gonflement à froid et à chaud, les résultats obtenus sont donnés dans les figures ci-dessous:

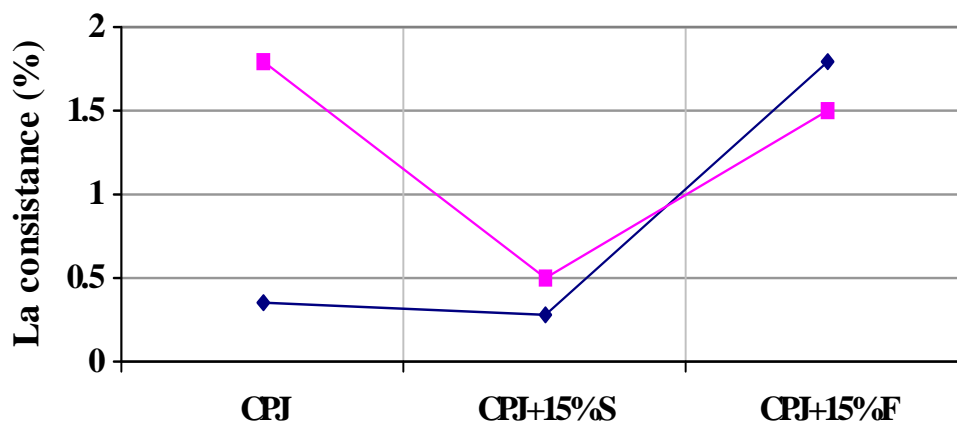


Fig. 4-7. Gonflement (à chaud et à froid) de la pâte de ciment en fonction du % de laitier et de filler

COMMENTAIRE

D'après les résultats obtenus (figure4-.7.) on voit que les valeurs du gonflement soit à froid ou à chaud sont inférieures à 10 mm d'allongement, d'où ce ciment présente une stabilité de volume. La norme [NF EN 197-1] et la norme [NF P 15-301] limitent cette expansion à 10mm. D'après LE CHATELIER le gonflement augmente avec l'accroissement du pourcentage de la chaux ou du gypse.

On constate que l'ajout de filler et de laitier fait diminuer le gonflement à chaud et à froid du liant. La forme $C_3A.3CaCO_3.27H_2O$ aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec $CaCO_3$, [Klemm et adams. 1990]. Cependant, la stabilité de ce produit est limitée. L'action du dioxyde de carbone atmosphérique sur un matériau cimentaire provoquerait la formation d'hémicarboaluminate dont la composition chimique est donnée par la formule suivante: $C_3A.0,5 CaCO_3.0,5 Ca(OH)_2. 12H_2O$.

4.1.3. Action des eaux agressives

Le comportement du mortier ou du béton, placé dans un environnement chimiquement agressif, dépend de facteurs complexes et multiples liés, d'une part, à l'environnement (nature, concentration, renouvellement ou non des éléments agressifs), d'autre part, au béton lui-même (nature et dosage des constituants, condition de fabrication).

Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, mais surtout sulfates), On peut alors observer des dégradations des ouvrages en béton par dissolution et érosion en cas d'attaques acides, par fissuration et éclatement dans le cas d'attaque saline, en particulier sulfatiques. Ces altérations d'origine chimique peuvent être amorcées ou renforcées par des actions physiques (chocs thermiques, cycles d'humidification-dessiccation,) ou mécaniques.

Afin d'avoir un béton résistant aux eaux agressives, il faut déterminer le coefficient de qualité (A) qui est défini par la formule suivante :

$$A = \frac{R_s}{R_{ep}} \quad (4-1)$$

R_s : résistance à la compression des ciments immergés dans différentes solutions agressives.

R_{ep} : résistance à la compression des ciments immergés dans l'eau potable.

Le ciment est d'autant plus durable que le coefficient de qualité est plus élevé.

La résistance aux eaux agressives est déterminée à partir des éprouvettes cubiques $[2 \times 2 \times 2] \text{ cm}^3$ en pâte pure avec un rapport fixe $E/(C)$ et $E/(C+S)$ égale à 0.3. Le durcissement des éprouvettes était en conditions naturelles pendant 7 jours (temps zéro), puis les pâtes de ciment durcies sont immergées séparément pendant 28j, [3 et 6] mois dans les solutions suivantes : eau potable, [MgCl_2 (5%)],[Na_2SO_4 (5%)].

Les résultats obtenus sont représentés dans les figures [4-08 .4-09].

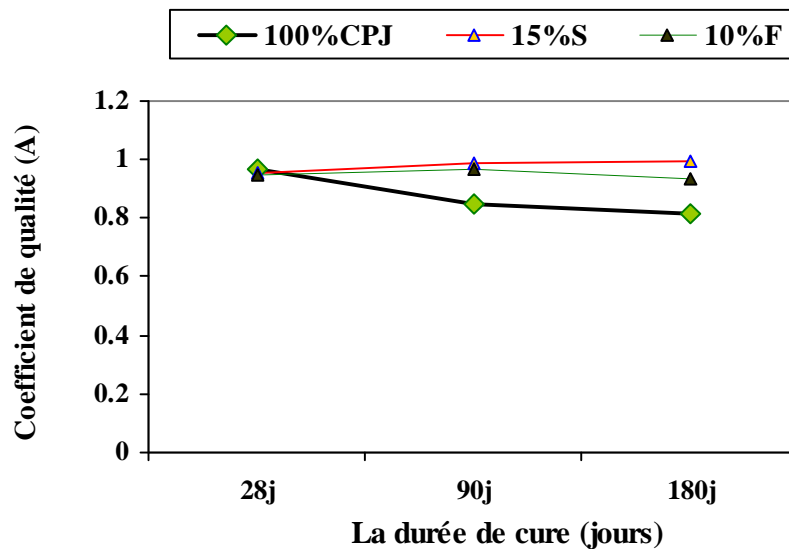


Fig. 4-8. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution MgCl_2 en fonction du temps et du % de laitier et de filler

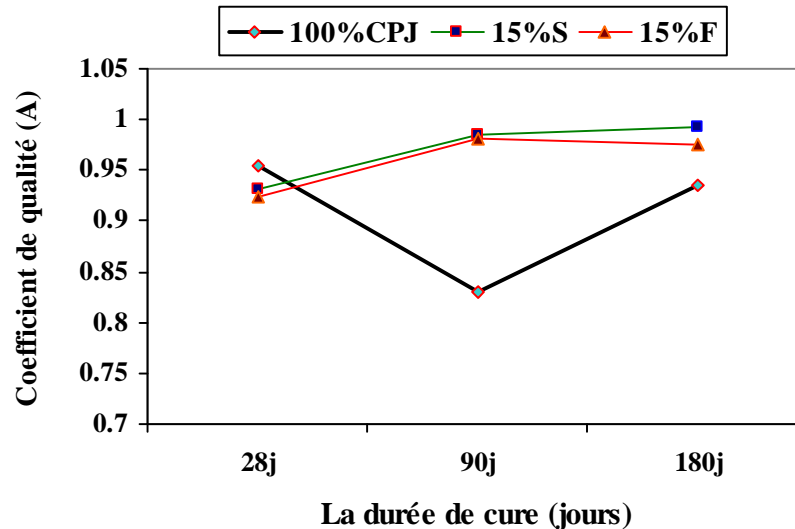


Fig. 4-9. La variation du coefficient de qualité des pâtes de ciment immergé dans la solution Na_2SO_4 en fonction du temps et du % de laitier et de filler

COMMENTAIRE

L'une des raisons initiales pour utiliser divers ajouts minéraux dans le mortier est leur influence sur la résistance du mortier aux attaques chimiques.

Cette résistance n'est pas seulement due à la composition chimique de la pâte de ciment hydraté, mais aussi à sa microstructure.

Il n'est pas exagéré de dire que les ajouts minéraux ont une influence majeure sur tous les aspects de durabilité relatifs à la migration des agents agressifs à travers le mortier et le béton.

Nous constatons, d'après les résultats obtenus [fig. 4-7,4-8,4-9], que le coefficient de qualité (A)(voir l'équation 4-1), dans toutes les solutions agressives, est lié par le type d'additions et de l'accroissements du pourcentage des ces ajouts.

-Les ciments avec filler et le laitier montrent une meilleure résistance dans le milieu nocif, ce comportement est principalement attribué à leur faible teneur en chaux, car $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ est souvent responsable des dégâts du béton.

Les pâtes de ciments immergées dans la solution $[\text{Na}_2\text{SO}_4]$ montrent une augmentation relativement importante du coefficient de qualité jusqu'à 3 mois. Cela est dû à l'augmentation de la valeur du pH qui stabilise la formation des cristaux de **CSH**.

D'après les résultats précédents, nous remarquons que l'action de la solution $[\text{MgCl}_2]$ sur les pâtes de ciments est plus nocive. Cela peut être expliqué par le fait que l'incursion d'ions de chlorure dans la pâte est influencée par le cation du chlorure (les ions de chlorure attachés aux cations divalents pénètrent plus vite que ceux attachés aux ions monovalents) **[AM amine ; et autre 1997]**.

En comparant l'effet du milieu agressif de chlorures à celui de sulfates, on remarque que les sulfates influent plus que les chlorures sur le ciment avec filler et le laitier. Par conséquent, les ciments avec filler et le laitier sont plus durables dans les milieux où les chlorures sont prédominants.

SYNTHESE

D'après tout ce qui précède, on peut conclure que le ciment avec filler et le laitier est durable dans les solutions agressives. Cela peut être dû à la forte imperméabilité des pâtes de ciments durcies, ainsi qu'à la formation supplémentaire des hydrates CSH qui précipitent dans les pores,

4.2. ETUDE DU MORTIER

Dans cette partie ; il s'agit des essais de compression, flexion et de retrait.

Le sable utilisé pour la confection du mortier est un sable d'oued. Les essais sont à raison de six éprouvettes par essai effectués sur des éprouvettes en mortier de dimensions **[4×4×16] cm³**. Dans tous les essais le rapport E/C a été variable entre **[0.45-0.5]** pour tous les mortiers avec et sans ajout. Concernant les conditions de durcissement, dans cette partie on a procédé à un durcissement naturel (conservation à l'eau, **T=20°C**) des éprouvettes jusqu'à leur test.

4.2.1. Comportement mécanique

Dans cette partie, nous avons étudié, le mortier en fixant les quantités de laitier et de filler d'après les résultats retrouvés précédemment, avec une variation progressive du rapport E/C.

4.2.1.1. Influence de la quantité de laitier et de Filler sur le comportement mécanique des mortiers normalisés

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction du pourcentage de laitier et de filler, aux différents âges, sont rapportés dans la figure [4-10].

Pour que nos conclusions soient justifiées, nous avons gardé les paramètres suivants constants :

- Finesse du (CPJ) : 3371 cm²/g.
- Finesse du laitier (S) : 3500 cm²/g.
- Finesse de filler (F) : 3200 cm²/g.

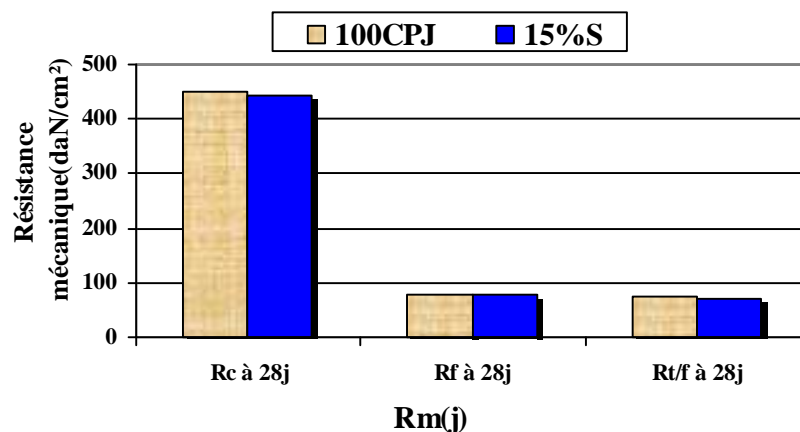


Fig. 4-10. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps et le % de laitier

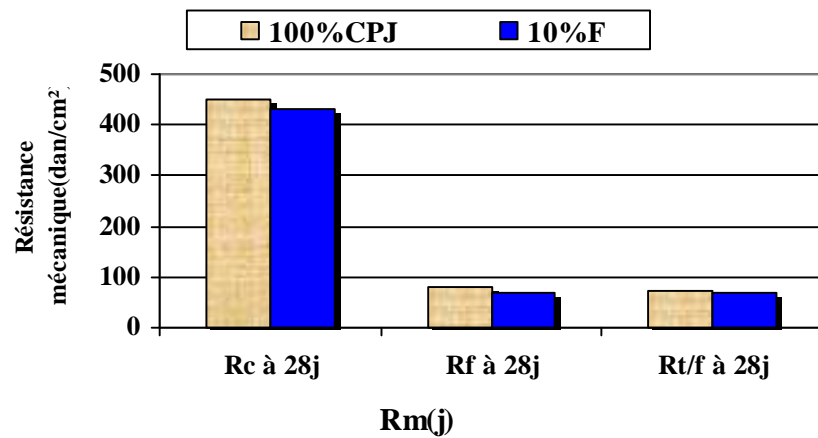


Fig. 4-11. Résistance du mortier à la compression, flexion et traction par flexion en fonction du temps et le % de filler

COMMENTAIRE

D'après les résultats obtenus dans la figure (4-10 ; 4-11) on remarque que les résistances mécaniques à la compression, flexion et traction par flexion augmentent avec l'addition de 15%F et de 15%S en fonction du temps..

Ce phénomène peut être expliqué par le changement de la structure des pores, qui fait augmenter le nombre de petits pores et fait diminuer le nombre de gros pores, par conséquent, il densifie la structure. Mais Les résistances mécaniques du mortier préparé avec des ciments composés (référence) sont habituellement meilleures que celles d'un mortier avec ajouts.

4.2.1.2. Influence de la quantité de laitier. Filler sur le comportement mécanique des mortiers

Les résultats de compression, flexion et traction par flexion en fonction le rapport E/C, le pourcentage de laitier et de filler, aux différents âges, sont rapportés dans les figures [3-11;3-24].

4.2-1-3. Le retrait et le gonflement

-Le retrait

La maturation des matériaux cimentaires s'accompagne d'une réduction dimensionnelle ou retrait, même en l'absence de chargement. On distingue une composante exogène, due à

des gradients hydriques ou thermiques régnant entre le matériau et le milieu environnant, et une Composante endogène générée par le matériau lui-même sans échange avec l'extérieur.

-Le gonflement

La pâte de ciment ou de mortier mûri continuellement dans l'eau après leur mise en place augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est du à l'absorption d'eau par le gel de ciment, Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement. De plus, l'intrusion de l'eau réduit la tension de surface du gel, provoquant par la suite une petite expansion.

Il s'agit dans cette partie, d'évaluer le retrait et le gonflement que provoque le ciment étudié sur des éprouvettes en mortier à sable normalisé avec un rapport E/C égale à 0,5.

On compare, à différents temps (t), la variation de la longueur et de la masse d'une éprouvette de dimensions $[4 \times 4 \times 16] \text{ cm}^3$, par rapport à sa longueur et sa masse à un temps (t_0) pris pour origine.

Les résultats obtenus sont rapportés dans les figures (3-12 ; 3-15).

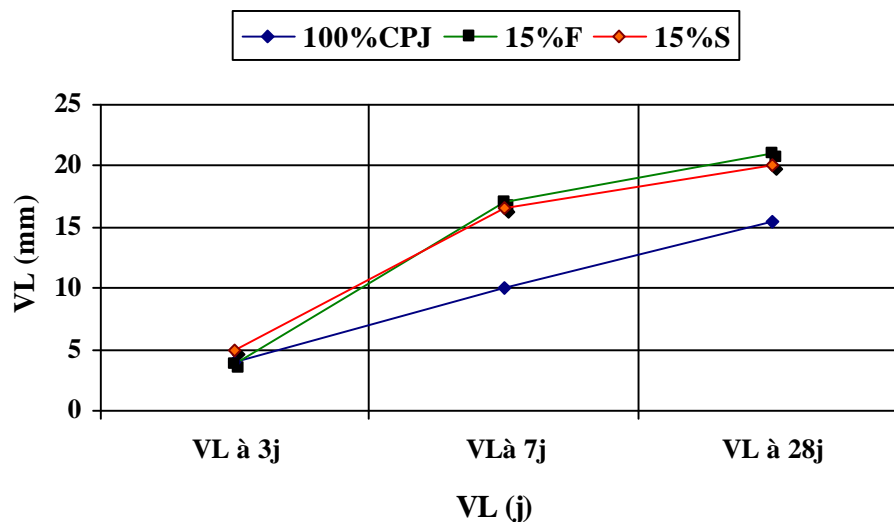


Fig. 4-12. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait

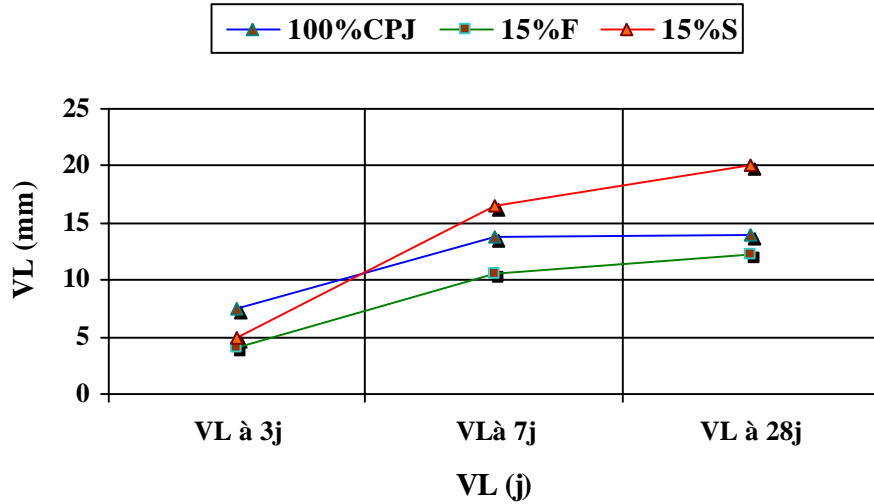


Fig. 4-13. Variations linéaires des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement

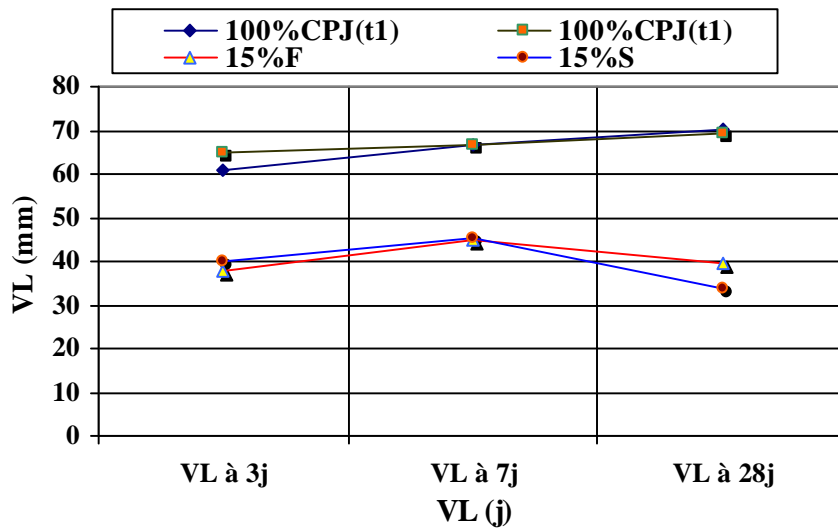
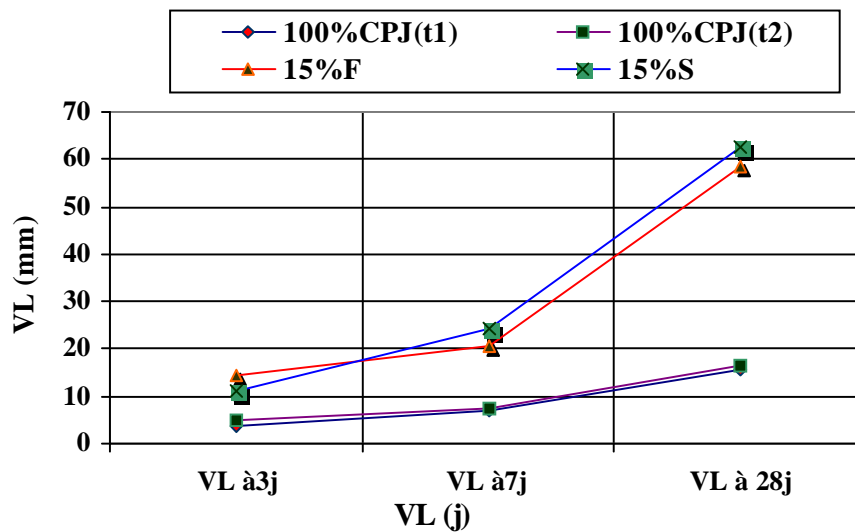


Fig. 4-14. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de gonflement



t1 : représente le témoin de mortier avec 15%F.

t2 : représente le témoin de mortier avec 15%S.

Fig. 4-15. Variations massique des mortiers en fonction du temps et % de laitier et de filler dans le cas de retrait

COMMENTAIRE

Pour la variation massique de mortier avec ajout réduit par rapport au mortier de référence. La variation massique augmente avec la diminution des pourcentages de l'ajout.

Nous savons que le gonflement observé après la prise est dû à la constitution d'hydrates comme la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui contrairement à la formation des autres hydrates, se fait avec une augmentation de volume. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable et le retrait deviendra important.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les mortiers avec laitier ou de filler renferment des retraits plus importants que ceux du mortier témoin (sans ajout). Cela s'explique par le fait que l'ajout de laitier et de filler fait diminuer la quantité de la chaux libre dans le mortier.

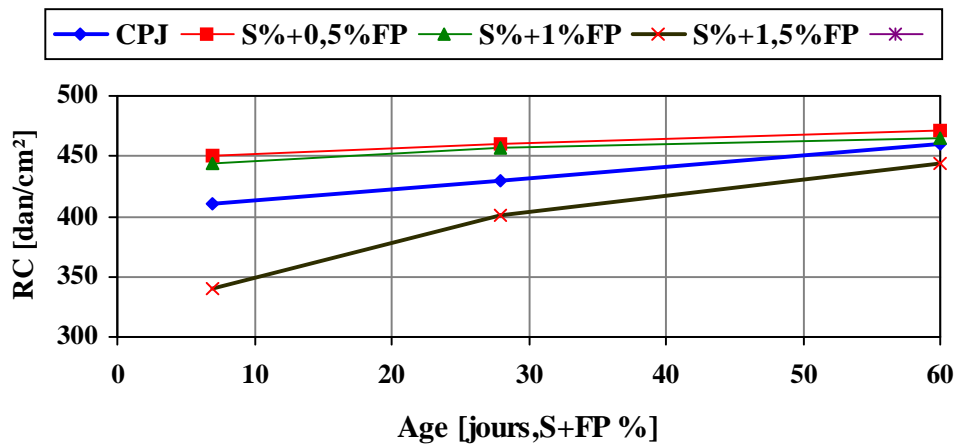


Fig. 4-16. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$

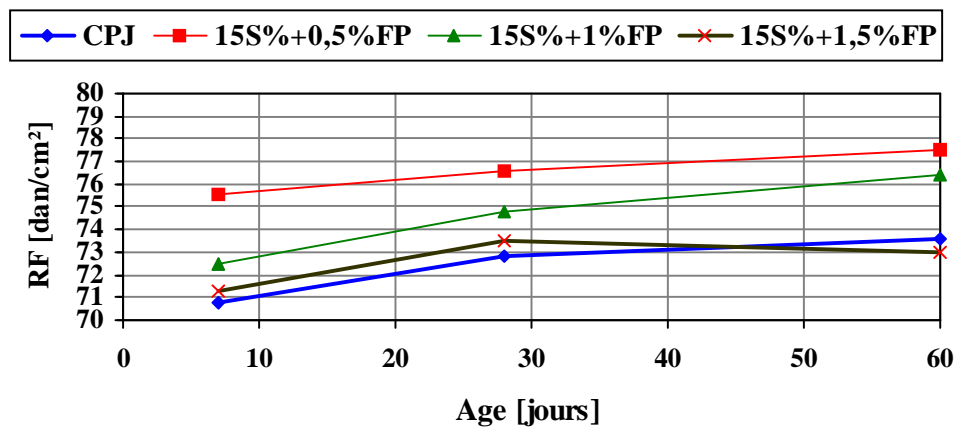


Fig. 4-17. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$

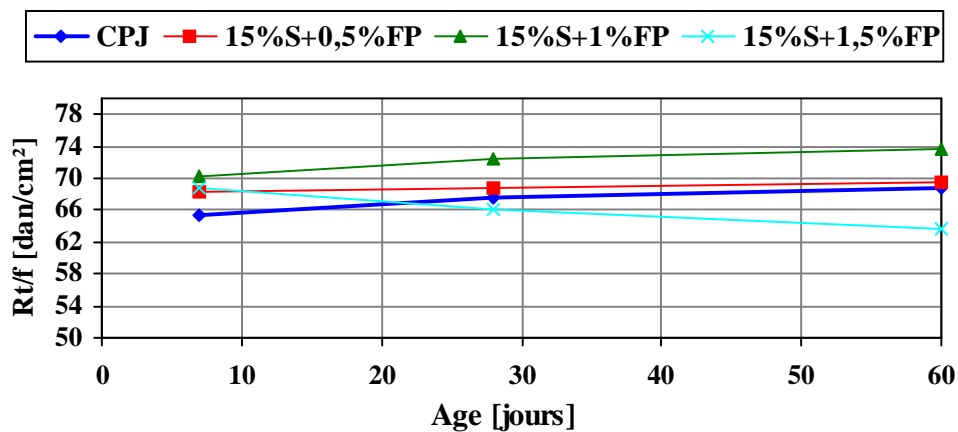


Fig. 4-18. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.45$

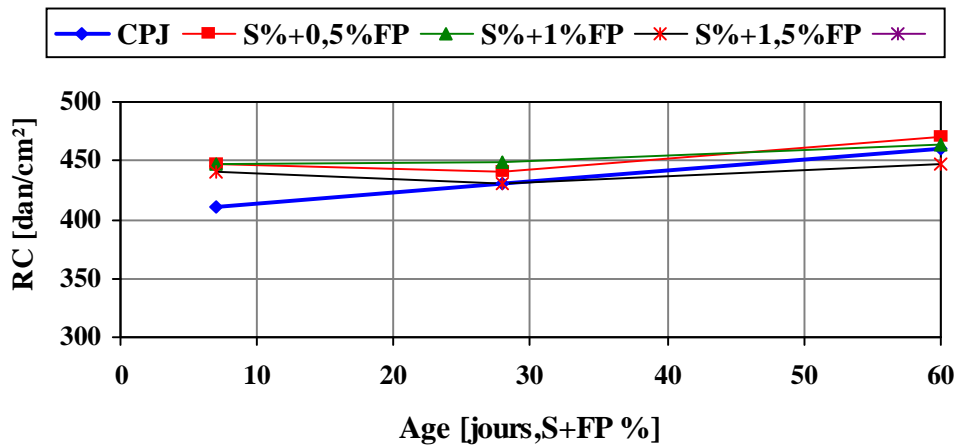


Fig. 4-19. Résistance du mortier à la compression en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$

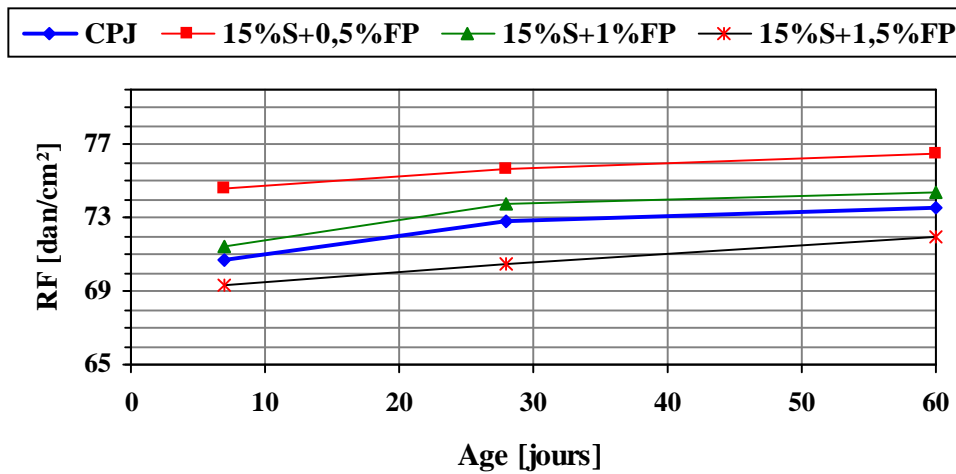


Fig. 4-20. Résistance du mortier à la flexion en fonction du temps et du pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$

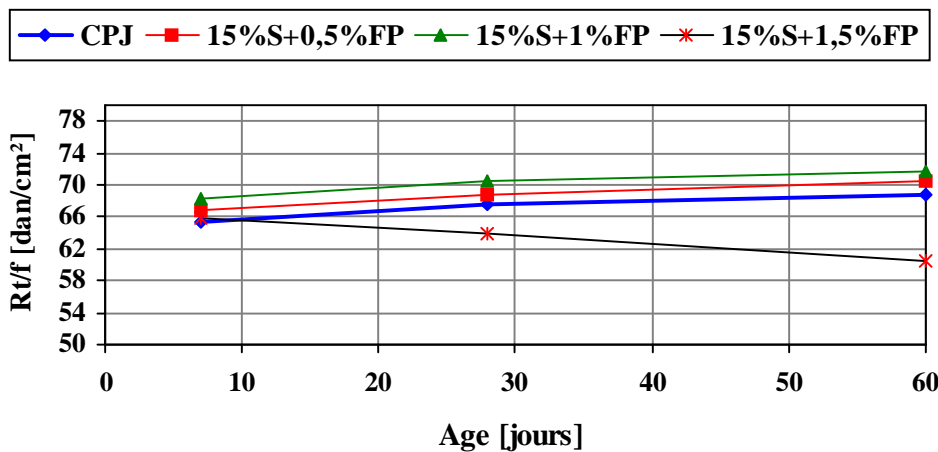


Fig. 4-21. Résistance du mortier à la traction par flexion en fonction du temps et pourcentage d'ajouts avec un rapport $E/C=0.5$

COMMENTAIRE

Au cours des 07 premiers jours, les résultats de la résistance mécanique obtenus pour le mortier avec 15% de laitier et 1.5% de fibre de polypropylène ont donné des valeurs proches à celles du mortier témoin et même pour les autres pourcentages on constate une légère différence de résistance quelque soit le rapport E/C.

De 28 à 60 jours, on constate que la résistance mécanique de compression du mortier de référence augmente par rapport au mortier avec 1.5%FP.

La résistance du mortier témoin reste inférieure à celle du mortier avec 15% de laitier pour différents pourcentages de fibres.

On remarque que la relation entre la résistance mécanique à la compression et le temps est une fonction linéaire quelque soit le changement du rapport E/C

Concernant l'influence de E/C on voit clairement sur l'ensemble des figures, que la résistance mécanique à la compression de tous les mortiers durcis à tout âge et décroît avec l'augmentation du rapport E/C. Ce rapport exerce une grande influence sur la porosité (constitue un réseau de pores plus fin et plus discontinu), car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage.

4.3- ETUDE DE BETON

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable et graviers ou pierres) conduisant à un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en oeuvre et qui possèdera, après durcissement, les meilleurs caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistances mécaniques, faible retrait, bonne durabilité etc.).

Plusieurs méthodes de composition sont proposées par des spécialistes tels que BOLOMEY, FAURY, VALLETTE, DREUX-GORISSE, SCRAMTAIEV... etc. quelle que soit la méthode utilisée, la composition du mélange calculée ne peut pas correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision la composition du béton, ceci peut-être dû à la qualité des constituants qui influent sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, type de granulats, finesse de mouture et classe vraie de résistance, etc.

La détermination de la composition du mélange de béton n'est qu'une première approche de préparation de mélange d'essais qui permettent de corriger expérimentalement la composition calculée pour aboutir au béton désiré.

• **Les résultats d'essais** : les différentes compositions préparées sont présentées comme suit:

- Béton témoin avec un rapport E/C varie entre (0.45-0.55).
- Béton avec 15% laitier et filler respectivement dans les mêmes rapports E/C.
- Béton avec différents pourcentages de fibre d'acier et propylène de (0.5-1.5) %.

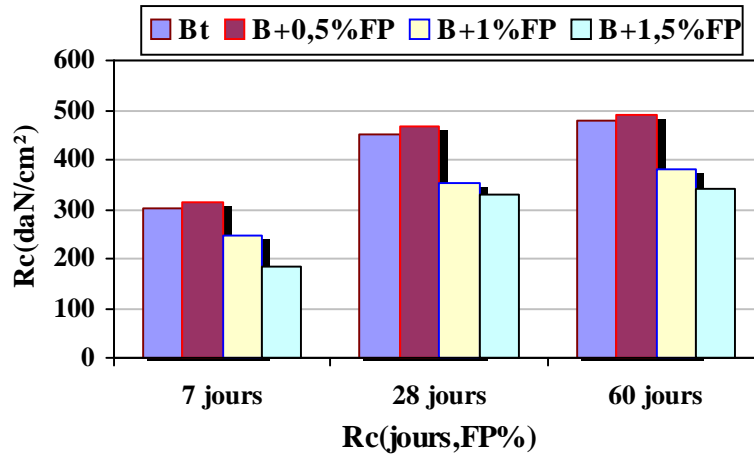


Fig. 4-22. Résistance à la compression du béton témoin avec différents % de fibre propylène en fonction de l'âge (E/C=0.45)

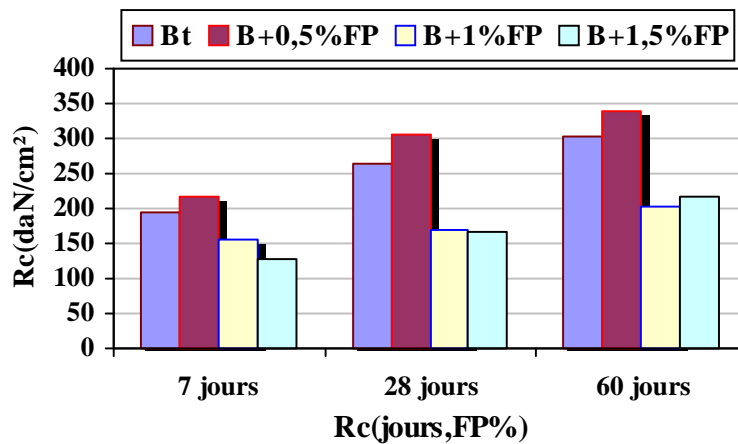


Fig. 4-23. Résistance à la compression du béton témoin avec différents % de fibre propylène en fonction de l'âge (E/C=0.50)

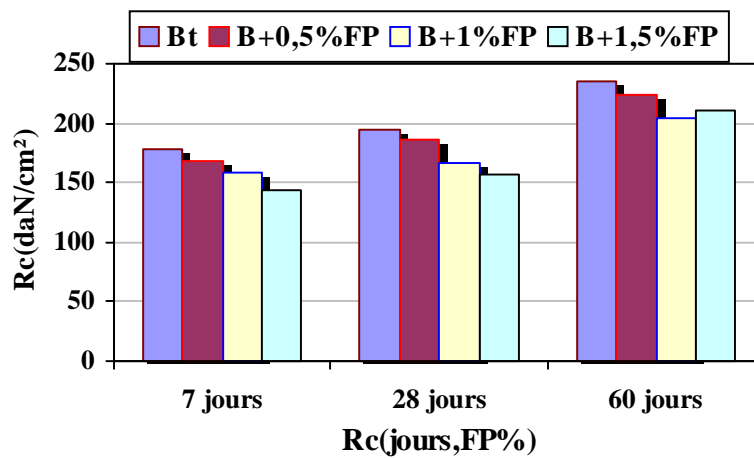


Fig. 4-24. Résistance à la compression du béton témoin avec différents % de fibre propylène en fonction de l'âge (E/C=0.55)

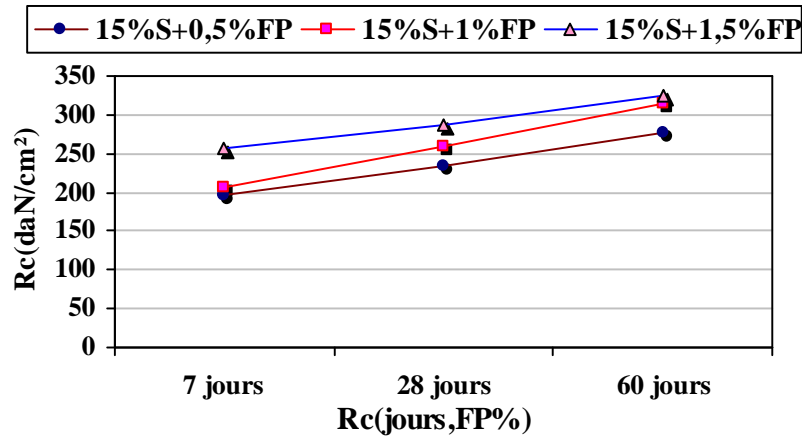


Fig. 4-25. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre propylène et 15%S en fonction du temps (E/C=0.45)

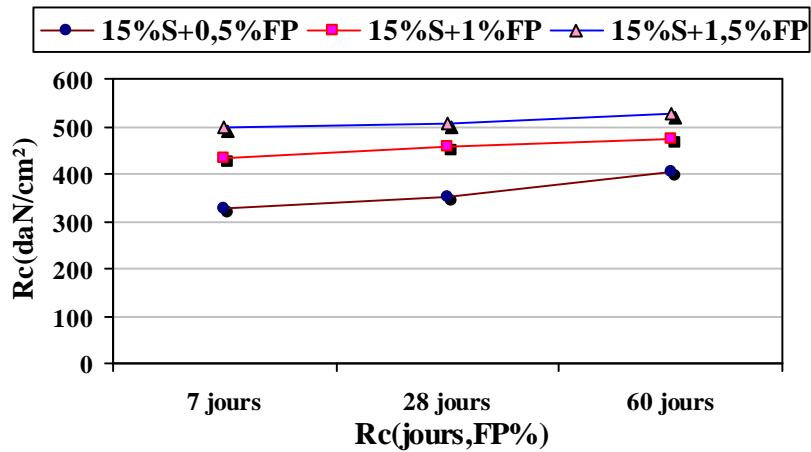


Fig. 4-26. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre propylène et 15%S en fonction du temps (E/C=0.50)

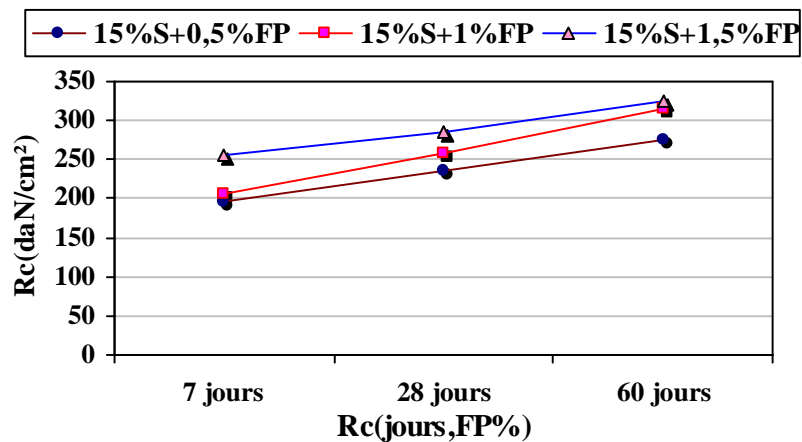


Fig. 4-27. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre propylène et 15%S en fonction du temps (E/C=0.55)

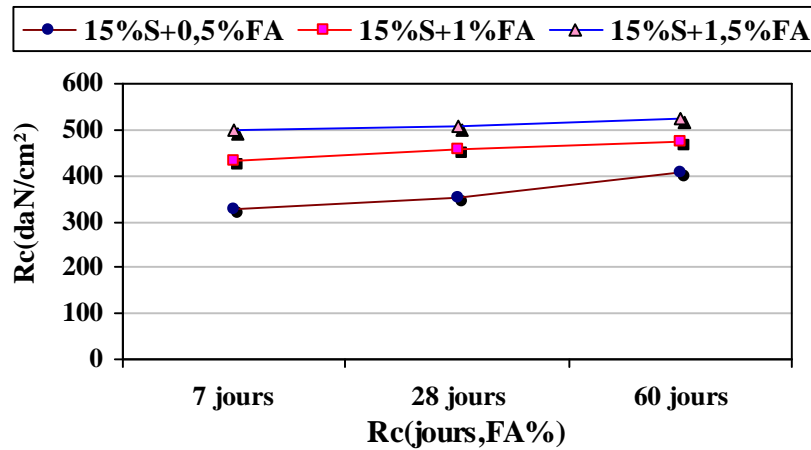


Fig. 4-28. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.45)

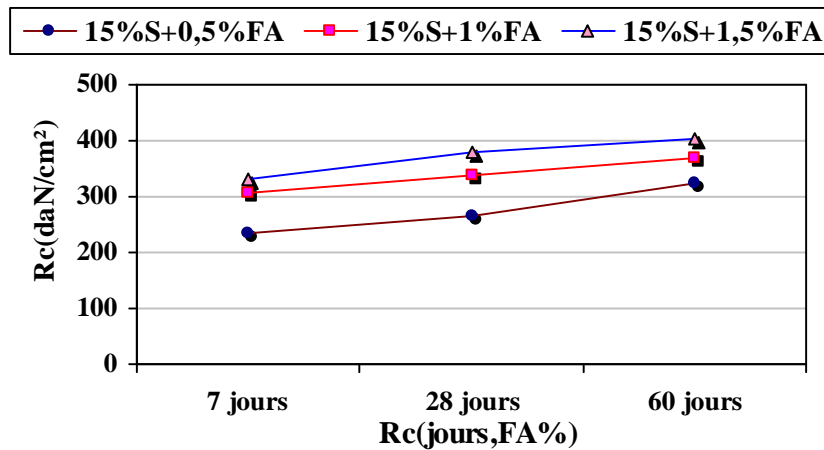


Fig. 4-29. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibres d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.5)

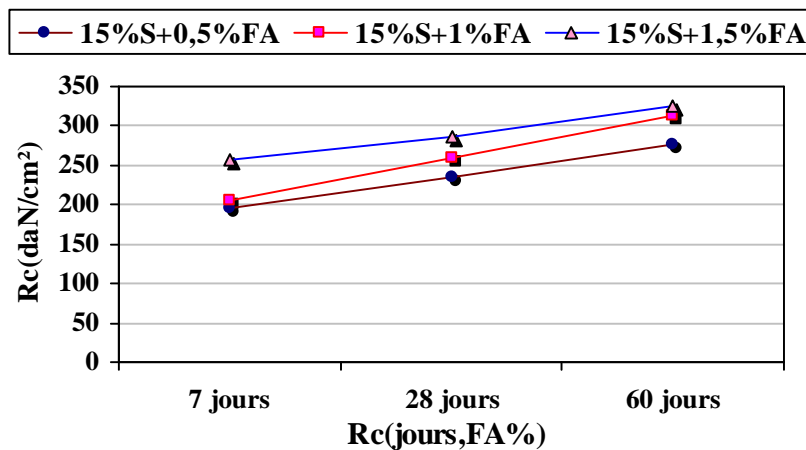


Fig. 4-30. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibres d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.55)

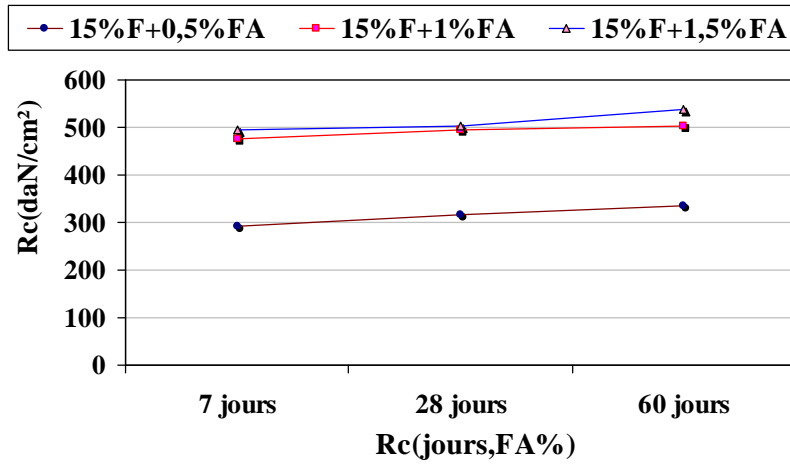


Fig. 4-31. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.45)

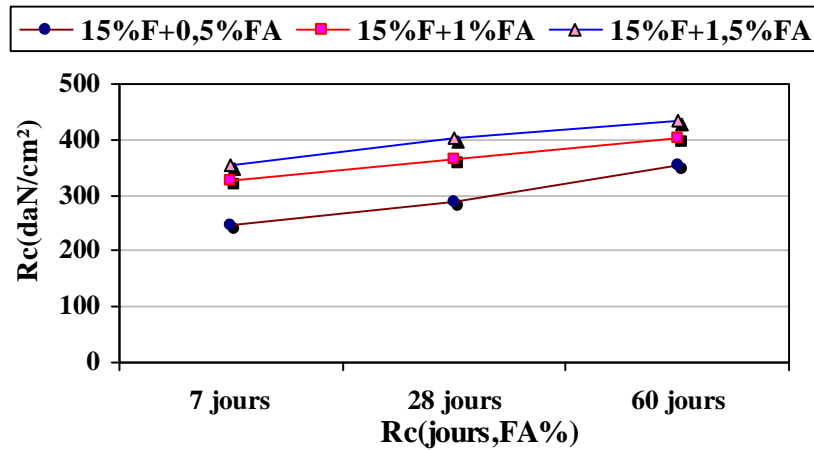


Fig. 4-32. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.5)

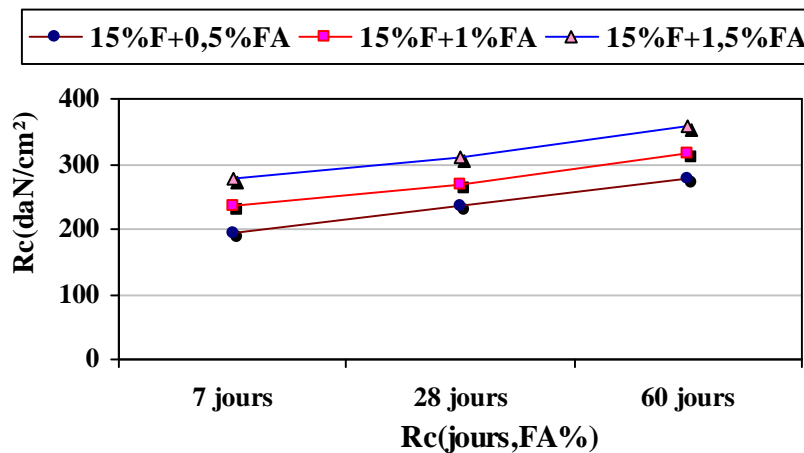


Fig. 4-33. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.55)

Interprétation des résultats

Les résultats des essais de compression pour les mélanges des bétons et bétons de fibres montrent que les bétons contenant l'ajout (0.5%, 1% à 1,5 %) de fibres propylène présentent une résistance à la compression légèrement plus améliorée que celle des bétons contenant des fibres d'acier.

Pour le dosage de 1% de fibres d'acier, on constate une légère diminution de la résistance à la compression. D'après [Rossi et al. 1996] les fibres perturbent l'arrangement granulaire.

Les représentations graphiques nous permettent une bonne interprétation des différents résultats. Néanmoins, il est très important de se référer aux figures quand il s'agit de constater des différences de valeurs ou pour des proportions.

Les graphiques des figures (4.22- 4.33) montrent et confirment que l'ajout de fibres d'acier engendre une légère augmentation de la résistance en compression des bétons. Cette amélioration est importante pour un dosage de fibres égales à 1.5%.

Ainsi, que malgré l'augmentation des pourcentages de fibres d'acier longues (0.5, 1.0 à 1.5%) on observe une diminution de la résistance à la compression par rapport au béton à 1.5% de fibres polypropylène.

L'augmentation des dosages en fibres d'acier de (0.5, 1.0 à 1.5 %) n'apporte qu'une légère amélioration des résistances finales à 28 jours par rapport à celles des bétons témoins. Mais pour le dosage de 1% elle n'apporte qu'une faible diminution de sa résistance finale à 28 jours par rapport à celle des bétons témoins.

Le mélange du béton avec 15% de laitier et avec les différents pourcentages de fibre donne des résultats de résistances plus élevées en fonction de l'âge par rapport au béton témoin sans ajouts. Par contre on observe une différence de résultats de résistance béton avec 15% de filler par rapport au béton avec le même pourcentage de l'ajout de laitier à cause de la présence du carbonate de calcium (Ca_2O_3) dans le mélange car ce dernier est responsable de la dilution du mélange granulaire.

On peut dire que les fibres d'acier n'apportent pas une amélioration appréciable en compression., ce qui explique que la fibre crée des défauts supplémentaires à l'interface fibre – matrice qui peuvent servir d'amorce à l'endommagement et donc limiter la charge maximale.

. On peut penser dans ce dernier cas, que cette diminution est due à une mauvaise mise en œuvre, liée à une faible maniabilité, qui entraîne la formation de vides responsables des résistances plus faibles que celles du béton avec ajout de laitier ,filler et fibre polypropylène respectivement .

4.3.1. Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression

Pour les bétons renforcés par fibres d'acier, les résultats obtenus, illustrés dans les figures 4-28 et 4-33 permettent d'observer la diminution de la résistance de bétons renforcés par fibres d'acier, de rapport E/C variant entre 0,45 et 0,55. Cela confirme que l'augmentation du rapport E/C (augmentation de la quantité d'eau) provoque une diminution de la résistance à la compression. On note ici qu'avec les éprouvettes de béton de fibres avec les différents pourcentages en volume, la résistance a légèrement augmenté dans le rapport E/C = 0.45. Mais dans le rapport E/C=0.5, une diminution significative est enregistrée avec les différents pourcentages de fibres d'acier Les résultats obtenus illustrés dans les différentes figures montrent que la résistance des bétons renforcés par les fibres d'acier de rapport E/C variant de 0.45 à 0.5 sur les éprouvettes cubiques(10*10*10)cm³ est variable en fonction du temps.

Les résultats des essais d'éprouvettes cubiques (10*10*10) cm³

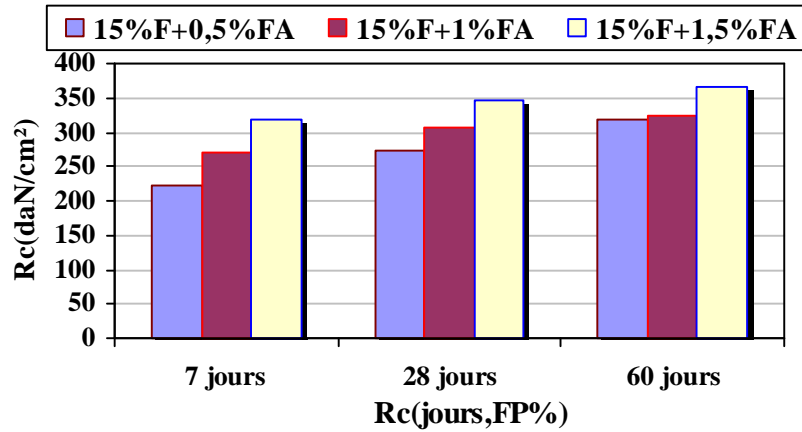


Fig. 4-34. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.45)

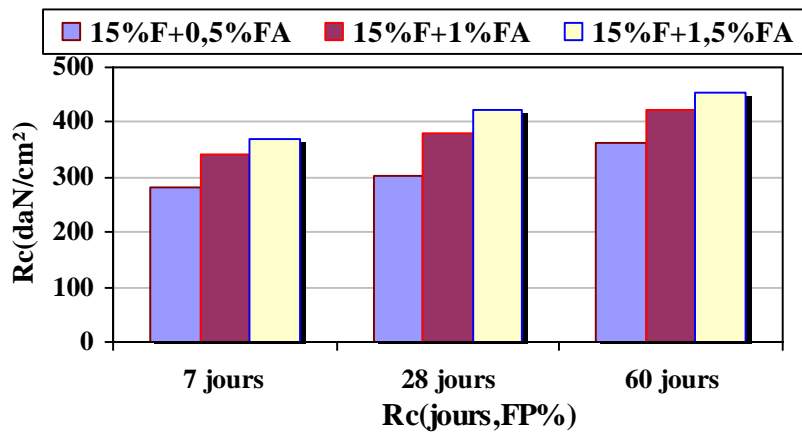


Fig. 4-35. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.50)

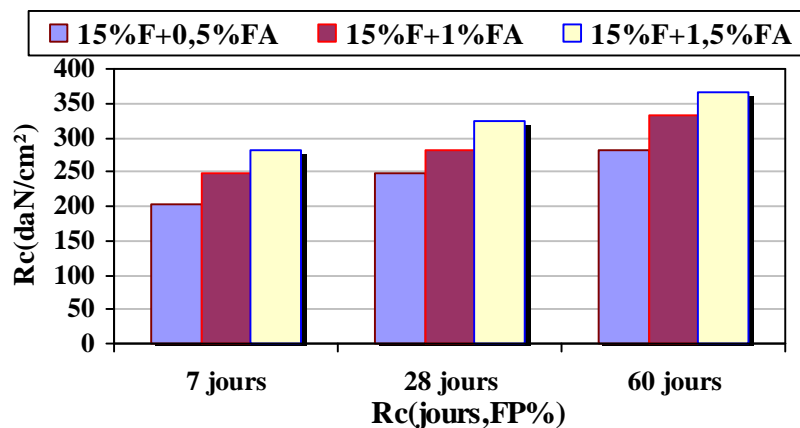


Fig. 4-36. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.55)

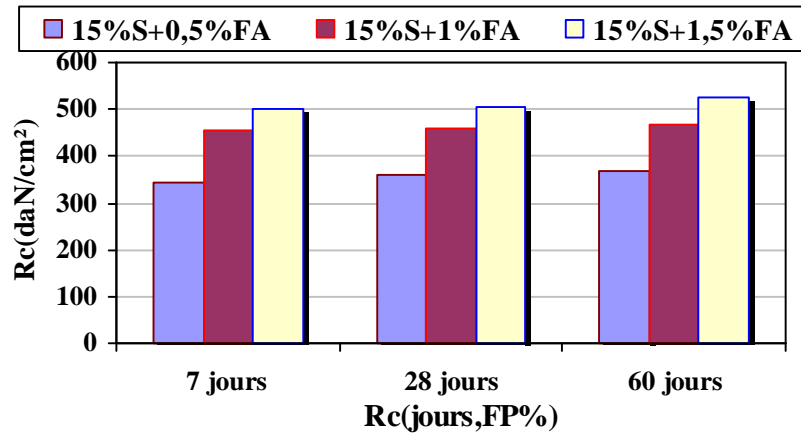


Fig. 4-37. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.45)

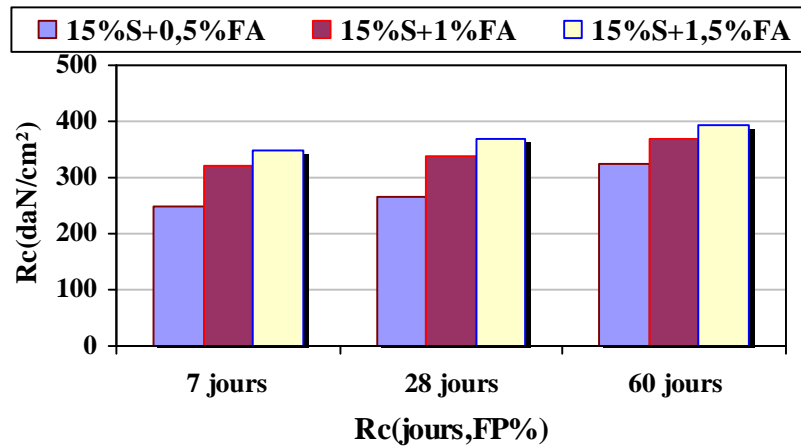


Fig. 4-38. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.50)

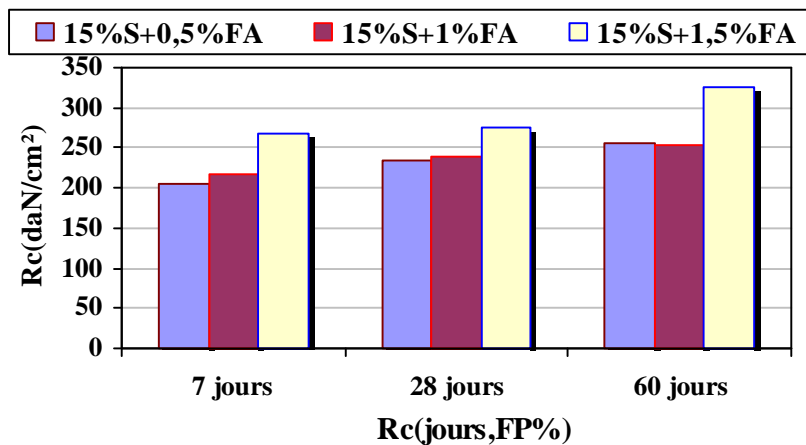


Fig. 4-39. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%Sen fonction du temps (E/C=0.50)

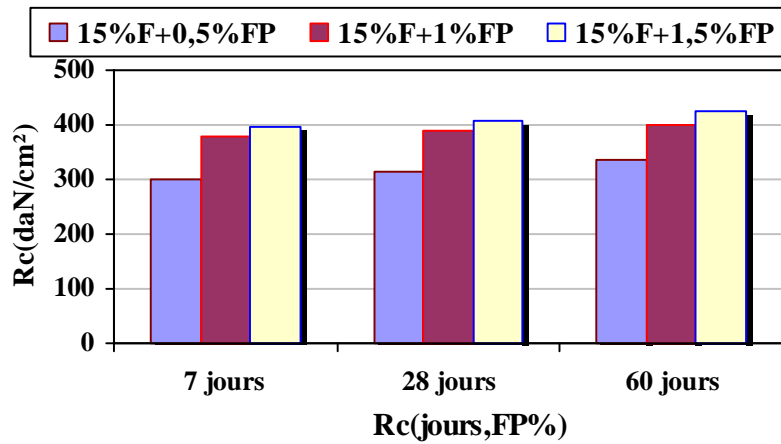


Fig. 4-40. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.45)

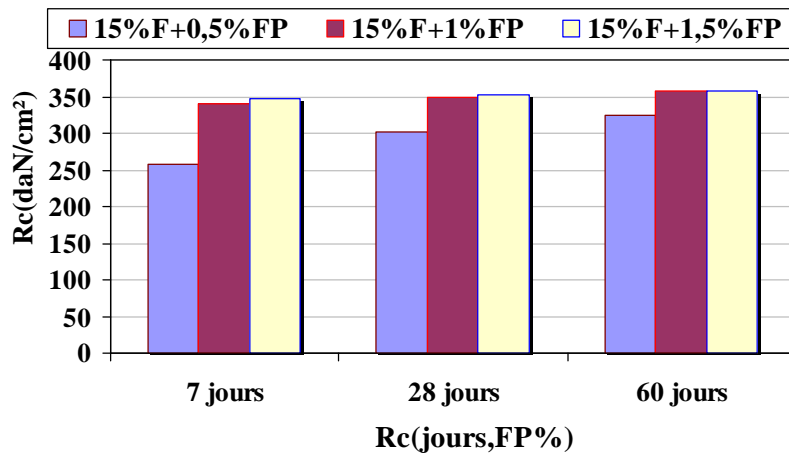


Fig. 4-41. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.50)

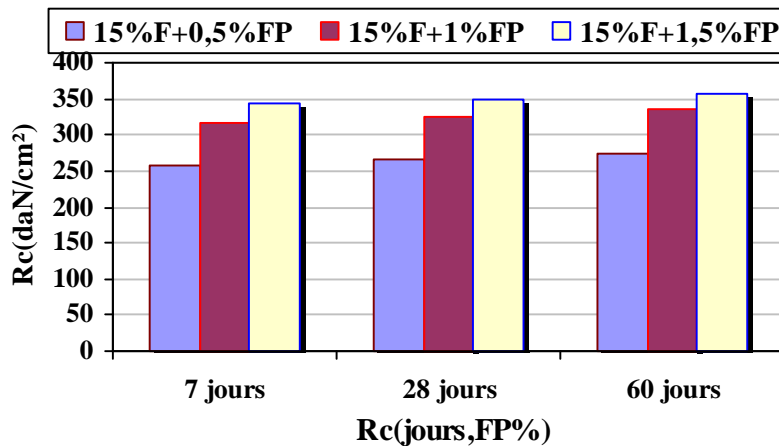


Fig. 4-42. Résistance à la compression du béton avec différent pourcentage de fibre d'acier et 15%F en fonction du temps (E/C=0.55)

COMMENTAIRE

Nous rapprochons, les résultats montrés sur les figures 4-34 jusqu'à 4-42), à l'état de connaissance sur le comportement mécanique (mécanisme interne particulier) des bétons de fibres, et sur les problèmes technologiques découlant de leurs élaborations.

Il en ressort dans ce chapitre les points suivants :

- Les propriétés du béton renforcé de fibres dépendent principalement des caractéristiques du béton (matrice), du type de fibres et de façon significative de la méthode de confection.

- La distribution des fibres courtes ou longues notamment les fibres d'acier est orientée de façon aléatoire dans les matériaux à base de ciment, diminue la maniabilité, et augmente le volume des vides dans le mélange.

- Les facteurs qui influencent les caractéristiques des bétons et des mortiers renforcés de fibres d'acier ou bien des fibres de propylène à l'état frais sont : la géométrie des fibres, la teneur en fibres, la teneur et la taille des granulats.

- Pour tester l'ouvrabilité du béton renforcé de fibres d'acier on utilise les méthodes dynamiques. Parmi ces méthodes dynamiques, on peut citer le maniabilimètre L.C.L qui simule bien le comportement rhéologique des bétons de fibres. Cet appareil peut être utilisé avec succès pour l'établissement de formulation du béton de fibres quelque soit la composition.

- La baisse d'ouvrabilité est autant plus importante si :

- Le rapport l/d est grand ;
- Le diamètre du plus gros granulats est grand
- Le pourcentage de fibres est élevé.

- Les fibres doivent être distribuées de façon homogène dans le mélange du béton pendant le malaxage pour éviter d'avoir l'agglomération de fibres ou la formation de pelotes de fibres.

- Les bétons renforcés de fibres d'acier présentent une très bonne résistance au choc et un comportement à la rupture supérieur à celui des béton avec des fibres de propylène, donc l'incorporation de fibres d'acier dans le béton ou dans le mortier en vue d'améliorer leurs performances mécaniques à condition d'avoir une forte imperméabilité du mélange.

- Les fibres d'acier peuvent améliorer de façon significative la résistance à la flexion, dans le cas de forts dosages en fibres, ainsi elles augmentent la ductilité et le maintien d'une résistance à la traction après la fissuration.

- Le principal intérêt des fibres d'acier est leur capacité à se mettre en œuvre comme un béton ordinaire ce qui permet un gain de temps, et souvent de qualité, par rapport à une solution traditionnelle. Il apparaît cependant un manque de quantification des caractéristiques mécaniques en fonction du type et de la quantité de fibres.

- En général les caractéristiques des fibres et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.

CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus dans notre présente étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes:

Les résistances à la compression de la pâte de ciment augmentent lors de la substitution des fillers calcaires traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des mortiers par double effet: physique et chimique.

A titre de comparaison entre les types de béton et mortier avec leurs variations de pourcentages en fibres utilisées et par rapport aussi aux bétons et mortiers témoins il ya lieu de montrer ce qui suit :

- Pour le mortier renforcé de fibres d'acier ;on constate que la présence des fibres d'acier modifie les caractéristiques mécaniques de la matrice du mortier. Il a été également observé que les éprouvettes avec fibres sont plus poreuses que celles sans fibres et que cette porosité augmente en fonction du taux de fibres.

• Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que l'introduction de 1, 5% de fibres d'acier courtes d'un mortier avec $E/C = 0.45$, présente une amélioration de la résistance à la compression par rapport au mortier sans fibres.

• Avec 1.5% en mélange de volume de fibre, la résistance à la flexion de mortier renforcé de fibre d'acier augmente par rapport à celle du mortier sans fibres.

• Avec un taux élevé de fibres d'acier, on observe une diminution de la résistance par rapport à celles sans fibres on constate aussi que la porosité augmente en fonction du taux de fibres.

• Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que l'introduction de 0.5% à 1.5% de fibres d'acier au bien fibre propylène dans un mortier avec $E/C = 0.45$, présente une amélioration de la résistance à la compression par rapport au mortier sans fibres.

• Au delà de 10% de fibres d'acier, on observe de faibles performances mécaniques (résistance à la flexion et à la traction par flexion) des mortiers par rapport ceux sans fibres.

- Pour le béton renforcé de fibre d'acier :

- Nous avons montré que l'introduction de fibres d'acier permet un gain de résistance en compression (augmentation environ 10% pour le béton à 0,5% de fibres d'acier par rapport au béton témoin) et un gain en résistance traction par flexion (augmentation environ 60% pour le béton à 1% de fibres d'acier par rapport au béton avec 1.5% de fibre propylène).

Comparativement aux mortiers et bétons renforcés par des fibres d'acier et ajouts cimentaires; les mortiers et bétons renforcés par des fibres de polypropylènes donnent une résistance mécanique à la compression plus élevée.

Par ailleurs, les performances mécaniques sont étroitement liées à la présence des ajouts et fibres dans la matrice cimentaire avec un taux bien déterminé.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- **ACI COMMITTEE 544**, “ *State of the art report on fibre-reinforced concrete* ”-*Am.Conc Ins.Proc Vol 70., N° 11., November 1973., pp.729-744.*
- 2- **ACI COMMITTEE.** “ *State of the art report on fibre reinforced concrete* ”, *Journal.American Concrete Institute., March-April 1984, pp.140-146.*
- 3- **ANTOINE, E.N.**, “ *Fibre reinforced for concrete* ”, *Concrete International design and construction, Vol 7., N° 3., March 1985, pp.21-25.*
- 4- **BATTELLE DEVELOPMENT CORPORATION.**; “ *Concrete and steel material* ”, *British Patent N°1068163, December 1963.*
- 5- **BRAUN,M. &MAJDIC,A.**; “ *Reinforcing castables with stainless steel fibres* ” *Intercera., Vol 129., N°.129, 1980 , pp.113-118.*
- 6- **BEKAERT**, “ *Doc an innovative revolutionary concept for EMI and conductive plastics* ” *Bekishield métal fibres, 1986.*
- 7- **BEDDAR, M.et al** ;“ *Influence of fibre geometry on the performance of refractory concrete.*” *Proceeding ICCM and ECCM 1986, Elsevier Applied Science publishers, Vol. 2, 1986, pp. 2.80 -2.89.*
- 8- **BOUCHEKOUK, M et al** “ *Etude de possibilité de renforcement du béton avec des fibres de verre enduites de polymères thermoplastiques* ” *Mortiers et bétons de fibres en France, CSTB-Ministère.Recher.& Enseign.Sup.ISBN2-86991-096-3,1987, pp.117-122.*
- 9- **BARON,J ;& LESAGE, R** “ *Méthode expérimentale de composition des bétons hydrauliques* ”, *Bulletin de liaison de LPC, Juillet-out 1976, N° 84, pp 130-140.*
- 10- **BALAGURU, P.,& RAMAKRISHNAN, V.** “ *Comparison of Slump Cone and V-B tests as measures of workability for fiber–reinforced and plain concrete* ” *cement Concrete Aggregate revue , Vol. 9, N° 1, 1987, pp 3-11.*
- 11- **BALAGURU, P** “ *Fibres Reinforced Concrete for structural Components.*”, *A state of art, Workshop on Fiber Reinforced cement & concrete, July 1994, Sheffield, U.K.*
- 12- **BANTHIA, N et al** “ *Concrete Reinforced with deformed steel fibers: Bond slip mechanisms.* ” *ACI materials Journal, vol : 61, n°5 , p. 435-446.*
- 13- **BAYASI. & JACK, ZENG.** “ *Properties of polypropylene fiber reinforced concrete* ” *ACI Materials Journal , Volume 90, N°.6, Nov - Dec 1993, pp. 605-61.*

-
-
- 14- CUSENS, A.R.** “ *The measurement of the workability of dry concrete mixes* ” *Magazine of Concrete Research*, Vol 8, N° 22, March 1956, pp 23-30.
- 15- DAVE, N. J & ELLIS, D.G.,** “ *Polypropylène fibre reinforced cement* ” *International Journal of cement composites*, Volume 1. N°.1, May 1979, pp.19-28.
- 16- DANILO, J. & FABIEN, Z** “ *Etat de connaissance sur les bétons armés de fibres* ”, *Journal Matériaux*, N°.347, Février, 1977, p.37.
- 17- DEBICKI, G, et al ;** “ *Fibrous Concrete, sensitivity of workability to percentage and type of fiber* ,” *Symposium Proceedings*, 26-28 Nov 1990, Boston, U.S.A, Edited by Sidney Mindess & Jan Skalny, U.S.A, Vol. 211, p. 127-132.
- 18- DEHOUSSE, N et al** “ *Les mortiers et les bétons renforcés de fibres d’acier* ” , *Revue C.S.T.C, Belgique*, 1974, N° 2, pp 2-14.
- 19- DARDARE, J.** “ *Contribution à l’étude du comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibres de polypropylène* ”; *RILEM Neville (A)*, 120, communication 5.2, pp.227-235.
- 20- DEHOUSSE, N.M.** “ *Méthodes d’essais et caractéristiques mécaniques des bétons armés de Fibres métalliques* ” *RILEM, Neville*, 120 *Communication 4.1*, pp. 119-136.
- 21- FICKLEY,W.;** “ *Improvements in reinforcing structures and wearing surfaces of hydraulic, bituminous like cement, concrete, asphalt* ” .*British Patent N°11754*, May 1914.
- 22- GRAHAM, G.M.;** “ *Reinforced concrete* ”, *US Patent N° 983,274*, February 1911.
- 23- GOPALARATMAN, V.S et al** “ *Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension* ” , *ACI Journal*, may- June 1985, Vol. 82, n° 3, pp. 310-323.
- 24- HANNANT, D.J** “ *Fiber Cements and Fiber Concretes.* ” *J. Wiley, Chichester*, 1978.London..
- 25- JOHSTON, C.D** “ *Steel fiber reinforced mortar and Concrete: a review of mechanical properties*”, *International symposium*, SP 44-7, pp. 127-142.
- 26- KOSAKA, Y. et al** “ *Lateral confining stresses due to steel fibers in concrete under Compression* ” *The international. Journal for cement composites and lightweight concrete*, Vol.7, N° 2, May 1985, pp. 81-92.
- 27- KRENCHER, H** “ *Fiber reinforced brittle matrix materials.*” *A.C.I International Symposium [1]*. SP 44-3, pp.45-77.
- 28- LANKARD, D.R. & SHEETS, H.D.;** “ *Use of steel wire fibres in refractory castables* ” . *Am. Cer. Soc.*, Vol. 63, No.7, 1971.

-
-
- 29- LIQUI, G ., & GILOFAN Z.,** “ A study on the mechanism of fibre reinforcement in short steel fibrous concrete ” *RILEM Symposium cement and concrete*, Edited by R.N.SWAMY, Sheffield, 13/1707-1986, 10p.
- 30- MARTIN, G.C.;** “ Method of forming pipe ”, US Patent N°.1,633,219, June 21, 1927.
- 31- MEHTA, P.K.,** “ Concrete : structure, properties, and materials ”, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986., 450p.
- 32- ODELBORG, G** “ Producing and Promoting of Swedish steel fibers to the market ”, In: *Steel Fiber Concrete Seminar Stockholm, June 1985*, Edited: S.P.Shah et al, Amsterdam, Elsevier, 1985, pp 185-197.
- 33- PILKINGTON. J;** “ Une nouvelle plaque ondulée sans amiante obtient un agrément officiel ”. *Cem-FIL NEWS*, N°.39, Automne 1987, p.1.
- 34- ROMUALDI, J.P. & BATSON, G.B.;** “ Mechanics of crack arrest in concrete ”. *Proceeding of American. Society of Civil Engineers*, Vol.89, June 1963, pp.147- 168.
- 35- ROMUALDI, J.P. & BATSON, G.B.;** “ Behaviour of reinforced concrete beams with closely spaced short lengths of wire reinforcement ”. *Journal. American. Concrete Institute* Vol.60, N°6, June 1963, pp.775-789.
- 36- ROMUALDI, J.P. & MANDEL, J.A.;** “ Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement ” *Journal. American. Proceeding.*, Vol.61, N°. 6, June 1964, pp. 657-671.
- 37- ROMUALDI, J..P. et al.;** “ Prevention and control of cracking by use of short random fibres ”. *J. Am. Conc. Inst. Publication SP-20 Paper N°.10* , 1968, pp.179-200.
- 38- ROSSI, P** “ Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques ” *Annales de l'ITBTP*, N° 492, série béton 279, 1991, pp.90-107.
- 39- ROSSI, P et al** “ Compressive behaviour of concrete: physical mechanisms and modelling ”, *J. Eng. Mech, ASCE*, 122(11), 1996, p. 1038-1043.
- 40- ROSSI, P** “ Les bétons de fibres métalliques.” *Presses des PC*, 1998, p 309.
- 41- SMITH, W.;** “ Ferroconcrete construction ”, US Patent N°. 1,349,901. June 21, 1927.
- 42- SWAMY,R.N et al;**“Workability of SFR lightweight aggregate concrete ” *Internatioanl. J. Cement Composites and Lightweight concrete*, Vol.4, N°2, 1982, p 103-109.

43- SERNA ROS, P “ *Etude de Contribution des fibres métalliques à l’amélioration du comportement du béton au cisaillement* ” Thèse Doct. Ing : Ecole national des Ponts et Chaussées, Paris, 1984, 77p.

44- TATTERSALL, G.H & URBANOWICZ C.R., “ *Bond Strength in steel fiber reinforced Concrete.*” Magazine Concrete Research, G.B, Vol 26, N° 87, June, 1974, pp 105-113.

45- VANUAT, M “ *Les bétons armés de fibres* ”. Le moniteur, N° 3, Janvier 1976, pp.55-58.

46- WEAKLEY, B.D.; “ *Bonding means for reinforced concrete structures* ”, US Patent N°13. 1,046,913, 10 December 1912.

RESUME

Ce travail porte sur la possibilité d'incorporer des fibres dans le mortier et béton dans le but d'améliorer quelques propriétés mécaniques d'une part, et de contrôler le comportement rhéologique et les caractéristiques physico-chimiques d'autre part.

Cette recherche qui s'est orientée vers l'incorporation des fibres dans le mortier ou dans le béton a pour but de connaître le comportement du béton à l'état frais et à l'état durci après renforcement par des quantités variées de ces fibres.

Cette étude a montré que plusieurs propriétés sont améliorées avec ce renforcement, surtout que les phénomènes : retrait durabilité ainsi que les propriétés mécaniques en compression, flexion et nécessitent l'amélioration.

Les résultats obtenus montrent bien que les fibres métalliques et polypropylènes peuvent être utilisées dans le béton comme renfort avec toute fiabilité et sécurité surtout dans les domaines où des sollicitations excessives peuvent exister.

Mots clés

Mortier, Béton, fibre, rhéologie, résistance mécanique, agressivité chimique.

ABSTRACT

This work concerns the possibility of incorporating fibres in the mortar and concrete with an aim of improving some mechanical properties on the one hand, and of controlling the rheological behaviour and the physicochemical characteristics on the other hand.

The purpose of this research which was directed towards the incorporation of fibres in the mortar or the concrete is to know the behaviour of the concrete in a fresh state and a state hardened after reinforcement by varied quantities of these fibres.

This study showed that several properties are improved with this reinforcement, especially that phenomenon: withdrawal durability as well as the mechanical properties in compression, inflection and require the improvement.

The results obtained show well that the metal fibres and polypropylenes can be used in the concrete like reinforcement with any reliability and safety especially in the fields where excessive requests can exist.

Key words

Cement paste, mortar, concrete, fibres, rheology ,chemical aggressively.

ملخص:

يتعلق هذا العمل في إمكانية دمج الألياف في الملاط والخرسانة لتحسين بعض الخصائص الميكانيكية من جهة ، و مراقبة السلوك الريولوجي والخصائص الفيزيوكيميائية من جهة أخرى.

هذا البحث كان موجها نحو إدماج الألياف في الملاط والخرسانة من اجل معرفة سلوك الخرسانة في الحالتين الرخوة والصلبة وهذا بعد تعزيزها بنسب مختلفة من هذه الألياف.

وقد أظهرت هذه الدراسة أن العديد من الخصائص قد تحسنت مع هذه الزيادة.

وتبين النتائج أن المعادن والألياف والبولي بروبيلين ويمكن استخدامها في تعزيز الملاط والخرسانة بكل أمان في المناطق المعرضة للقوى المؤثرة.

الكلمات الرئيسية:

الملاط ، الخرسانة ، الألياف، ريولوجيا ، الخصائص الميكانيكية.